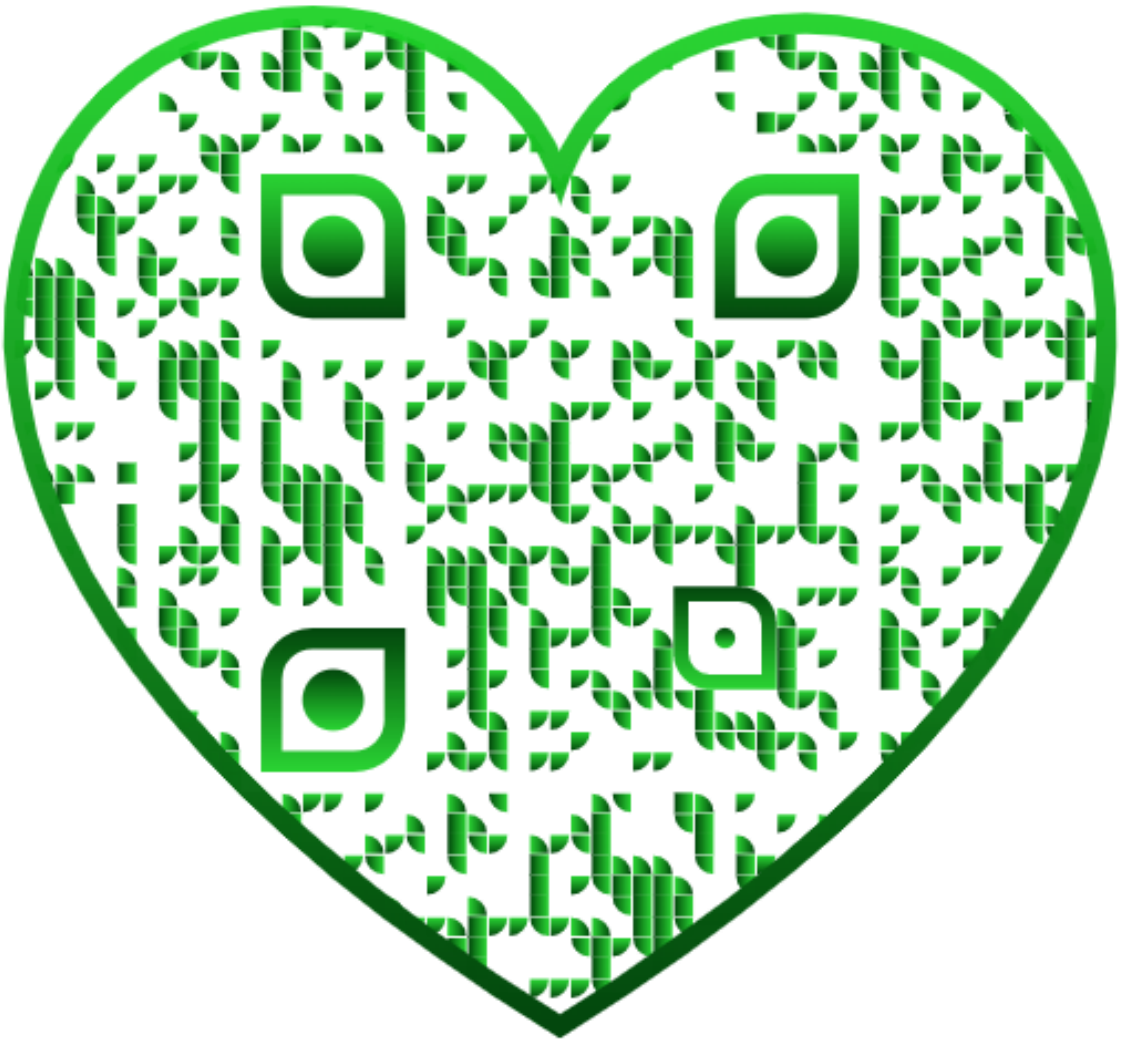
ANNE LABOURET • PASCAL CUMUNEL
JEAN-PAUL BRAUN • BENJAMIN FARAGGI

Cellules solaires

Les bases de l'énergie photovoltaïque

5e édition

ETSF
EDITIONS TECHNIQUES ET SCIENTIFIQUES FRANÇAISES



Nous remercions les sociétés Sharp, Shell Solar, Siemens, SOHO-EIT/ESA-NASA, BP Solar, Tenesol et Solems pour les documentations techniques.

Couverture : Rachid Maraï
Illustration de couverture : © Danielschoenen/Fotolia.com
Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteveille & Raphaëlle Danet

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.
Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 1998, 2001, 2005, 2010
© ETSF, Paris, 1995, pour la première édition
ISBN 978-2-10-055598-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos **1**

PREMIÈRE PARTIE

COMMENT ÇA MARCHE ? PRINCIPES ET COMPOSANTS

CHAPITRE PAGE

1 **Rappels d'électricité** **5**
1.1 Grandeurs physiques et unités 5
1.2 Générateurs et récepteurs 11
1.3 Montages série et parallèle 12

2 **Ensoleillement et lumière** **15**
2.1 Qu'est-ce que la lumière ? 15
2.2 Le rayonnement solaire 18
2.3 Les sources de lumière artificielles 26

3 **Cellules et panneaux photovoltaïques** **31**
3.1 Conversion de la lumière en électricité 31
3.2 Anatomie d'un photogénérateur 33
3.3 Fonctionnement électrique d'un photogénérateur 36
3.4 Les différentes technologies 43
3.5 Énergie solaire et environnement 46

4 **Stockage de l'énergie** **49**
4.1 Quand faut-il un stockage ? 49
4.2 Principales caractéristiques des accumulateurs 52
4.3 Technologies d'accumulateurs et leur adéquation au solaire 57
4.4 Le contrôle de charge 63

DEUXIÈME PARTIE

À QUOI ÇA SERT ? APPLICATIONS

CHAPITRE		PAGE
5	**Générateurs autonomes avec stockage**	**69**
	5.1 Les secteurs d'application	69
	5.2 Optimiser et économiser	73
	5.3 Calcul d'un système avec stockage	75
6	**Générateurs photovoltaïques raccordés au réseau – Toits et centrales photovoltaïques**	**83**
	6.1 Les principales applications	83
	6.2 Le concept du raccordement au réseau	85
	6.3 Énergie produite et rentabilité	87
7	**Montages électroniques avec des cellules solaires**	**91**
	7.1 Banc d'essai de la photopile	91
	7.2 Mélodie lumineuse	96
	7.3 Luxmètre	99
	7.4 Liaison sans fil alimentée par photopiles	108
8	**Alimentations par panneaux solaires**	**115**
	8.1 Éclairage d'un pas de porte avec détection de présence	115
	8.2 Alimentation d'un portail automatique	120
	Bibliographie	**123**
	Adresses utiles	**125**
	Index	**127**

AVANT-PROPOS

L'énergie photovoltaïque désigne la transformation d'une source d'énergie lumineuse en électricité et son utilisation. Elle est à distinguer de l'énergie solaire thermique, qui est une autre technique destinée au chauffage de l'eau par conversion directe de l'énergie solaire en calories à l'aide de capteurs plans.

Les cellules solaires et modules photovoltaïques sont des composants de conversion d'énergie qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. On parle généralement d'*énergie solaire photovoltaïque*, car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression *énergie lumière*, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (ampoules, tubes fluorescents…), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire.

Le Soleil, source énergétique quasi illimitée, est à l'origine d'un nombre impressionnant d'effets biologiques qui participent directement ou indirectement à la vie animale et végétale : il procure la chaleur, permet la photosynthèse, la vision, conditionne les rythmes biologiques, etc. L'originalité de l'énergie photovoltaïque telle qu'on l'entend ici est de transformer *directement* la lumière solaire en électricité. Et quand on sait que l'apport énergétique solaire total sur la planète est de plusieurs milliers de fois supérieur à notre consommation globale d'énergie, on comprend tout l'intérêt d'une telle démarche.

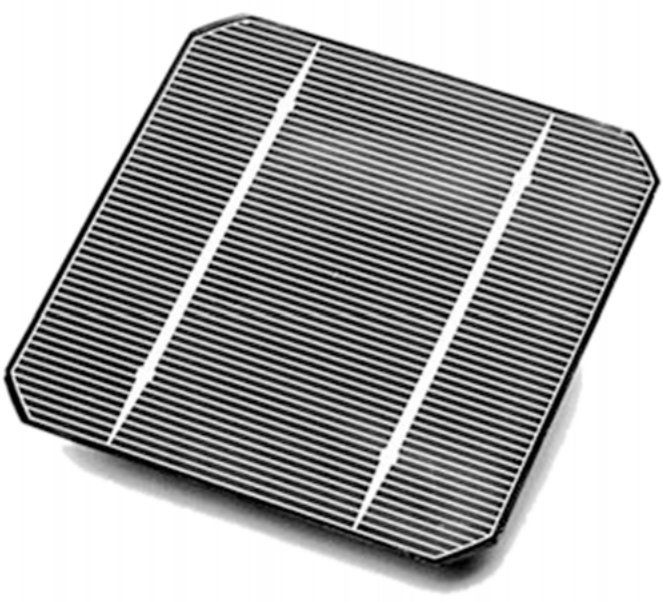
Cet ouvrage décrit le fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque et donne les bases de sa mise en œuvre pratique. Renouvelable, cette énergie respecte notre environnement en réduisant les émissions des gaz à effet de serre (elle n'en émet aucun lors de son utilisation). Les prix ne cessent de baisser grâce à l'accroissement des volumes de production car le marché est fortement stimulé par le rachat du courant par les compagnies d'électricité, et il croît de 40 % par an au niveau mondial depuis quelques

années. Peu de secteurs économiques peuvent afficher de tels résultats.

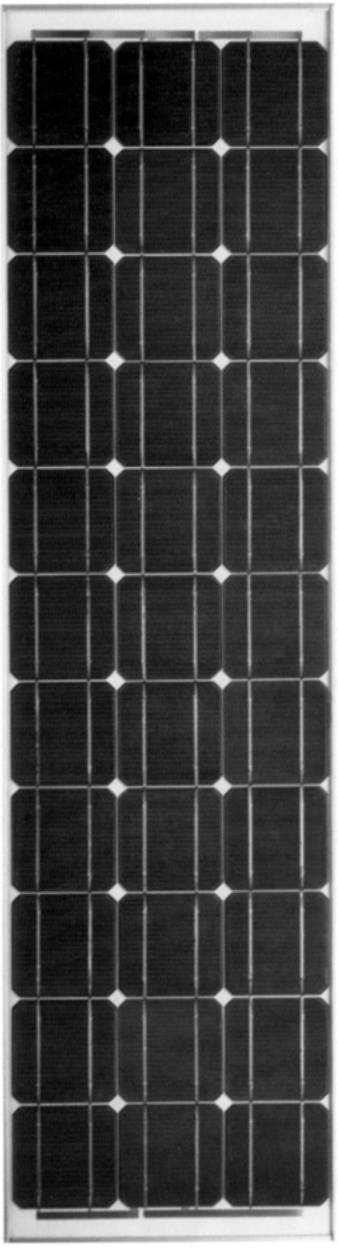
Pour conclure cette présentation générale, voici quelques détails de terminologie.

Cellule solaire et *photopile* sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels, soit en assemblage dans un *panneau solaire*, ou *module photovoltaïque*. Ces deux derniers termes, équivalents quand on parle d'énergie solaire électrique, désignent un capteur de plus grande taille et donc de puissance supérieure aux photopiles. Il y a également derrière les mots *panneaux* et *modules*, la notion d'emploi en extérieur de produits plus complets, avec un cadre, un câble… qu'il n'y a pas dans une photopile.

Quant au mot *photogénérateur*, il regroupe l'ensemble de ces composants d'énergie lumière en électricité, c'est pourquoi nous l'utiliserons pour les exposés d'ordre général.



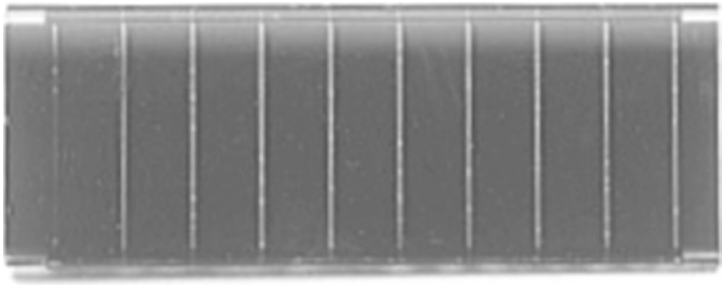
Cellule solaire au silicium cristallin (doc. Siemens).



Panneau solaire au silicium cristallin (doc. Shell Solar).

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Cellule solaire au silicium amorphe (doc. SOLEMS).



1 RAPPELS D'ÉLECTRICITÉ

Nous rappelons ici les bases d'électricité nécessaires à la compréhension des notions et phénomènes électriques. On trouvera donc dans ce chapitre des définitions, des principes et des unités auxquels il faudra se référer au cours de la lecture des autres chapitres en cas de nécessité.

1.1 GRANDEURS PHYSIQUES ET UNITÉS

Le courant électrique est une circulation de particules chargées, les électrons, présents dans toute matière.

Ce flux chargé est porteur d'énergie et nous rappelons ici comment on le caractérise. Pour une meilleure compréhension, nous ferons appel à des analogies avec une circulation d'eau, car toutes proportions gardées, les concepts sont les mêmes.

La différence de potentiel (ou *tension électrique*)

C'est en électricité la quantité d'énergie mobilisable par les électrons pour aller d'un point A à un point B d'un circuit.

La différence de potentiel aux bornes d'un générateur est appelée *tension nominale*. C'est la tension d'utilisation dans les conditions de fonctionnement normal.

La valeur de mesure est le *volt* (V). La tension électrique se mesure avec un voltmètre.

$$1\ V = 1\ 000\ mV = 1\ 000\ 000\ \mu V$$

où mV = millivolts et µV = microvolts.

Le symbole d'expression est la lettre *U*.

ANALOGIE

Soit un bidon d'eau, dans lequel on a fait un trou à mi-hauteur. La différence de potentiel correspondrait à la hauteur de la chute d'eau (**figure 1.1**).

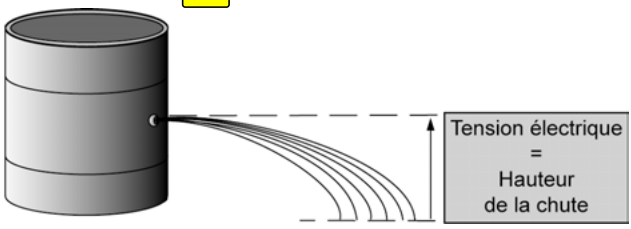


Figure 1.1.

Le courant électrique (ou *intensité*)

C'est en électricité la quantité d'électrons qui circule par unité de temps.

Le courant circulant normalement dans un circuit donné est appelé *courant nominal*.

La valeur de mesure est l'*ampère* (A). L'intensité du courant électrique se mesure à l'aide d'un ampèremètre.

$$1\ A = 1\ 000\ mA = 1\ 000\ 000\ \mu A$$

où mA = milliampères et µA = microampères.

Le symbole d'expression est la lettre *I*.

ANALOGIE

Le courant électrique correspondrait à la quantité d'eau qui s'écoule de l'ouverture par intervalle de temps *t* (c'est un débit) (**figure 1.2**).

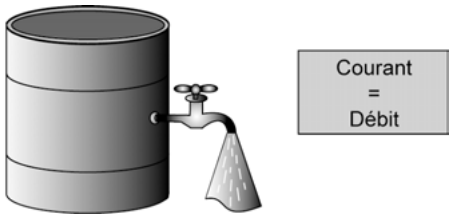


Figure 1.2.

La résistance (ou résistor)

La résistance mesure la « difficulté » de passage d'un courant. Elle se mesure en ohms (Ω). Pour un conducteur parfait, elle est reliée au courant et à la tension par la relation :

$$U = RI$$

ANALOGIE

Dans la comparaison avec la circulation d'eau, une résistance électrique pourrait être représentée par un tuyau étroit, qui limite le débit pouvant circuler dans une canalisation.

La puissance

C'est le produit de la quantité d'électrons (courant) par l'énergie mobilisable par les électrons (tension).

La valeur de mesure est le *watt* (W).

Le symbole d'expression est la lettre *P*.

ANALOGIE

La puissance correspondrait à la force de l'eau qui parcourt la hauteur de la chute avec un certain débit (**figure 1.3**).

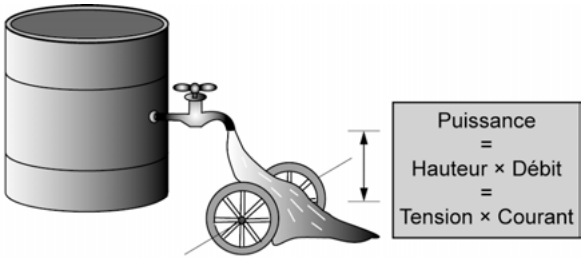


Figure 1.3.

La puissance s'exprime par la formule :

$$P = UI$$

$$(W) = (V)(A)$$

P s'exprime en watts, *U* en volts et *I* en ampères.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Exemple :

Une ampoule fonctionnant sous une tension de 12 V et consommant un courant de 0,5 A aura une puissance de :

$$P = UI = 12 \times 0{,}5 = 6 \text{ W}$$

Ampères-heures

C'est une quantité d'électricité ou une capacité égale au produit du courant par le temps écoulé :

$$Q = It$$

$$(\text{C}) = (\text{A})(\text{s})$$

ou :

$$(\text{Ah}) = (\text{A})(\text{h})$$

Elle s'exprime en coulombs (C), ou plus commodément en *ampères-heures* (Ah). Elle sert notamment à quantifier la capacité d'une batterie (en Ah).

ANALOGIE

La quantité d'eau qui s'écoule de l'ouverture pendant une durée *t*, donc un volume d'eau (**figure 1.4**) :

$$\text{Volume} = \text{Débit} \times \text{Durée}$$

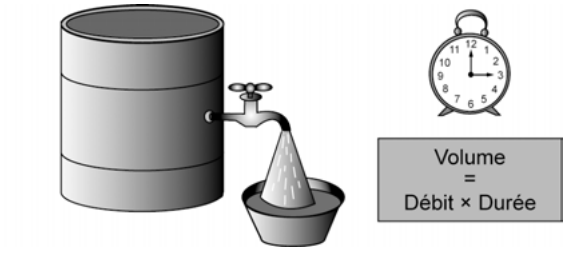


Figure 1.4.

Exemples :

1. Un appareil qui consomme 0,1 A en permanence aura consommé au bout de 10 jours une quantité d'électricité égale à :

$$0{,}1 \text{ (A)} \times 240 \text{ (h)} = 24 \text{ Ah}$$

2. Un accumulateur a une capacité de 10 Ah si l'on peut théoriquement le vider par exemple en 1 heure en consommant un courant de 10 A, ou en 5 heures avec un courant de 2 A.

La consommation électrique

C'est l'énergie électrique consommée ou produite pendant une unité de temps.

Cette grandeur nous est très familière puisque c'est celle qui sert de base au calcul de nos factures d'électricité domestique. Les compagnies d'électricité facturent à leurs clients le nombre de kilowatts-heure (kWh) qu'ils consomment. Quand on a allumé une lampe de 100 W pendant 10 h, on a consommé :

$$100\ \text{W} \times 10\ \text{h} = 1\ 000\ \text{Wh} = 1\ \text{kWh}$$

La consommation électrique correspond donc au produit de la puissance (en watts) par le temps (en heures) :

$$E = Pt$$

$$(\text{Wh}) = (\text{W})(\text{h})$$

Elle peut s'exprimer en joules (J), qui sont des (W)(s), ou plus commodément en watts-heure (Wh) :

$$1\ \text{kWh} = 3{,}6\ \text{MJ}$$

1 kilowatt-heure = 3,6 mégajoules = 3,6 millions de joules

C'est aussi la capacité multipliée par la tension :

$$E = UIt = QU$$

$$(\text{Wh}) = (\text{V})(\text{A})(\text{h}) = (\text{Ah})(\text{V})$$

ANALOGIE

La consommation électrique correspondrait au travail, ou à la quantité d'énergie, qui a été fournie par la chute d'eau pendant le temps considéré (**figure 1.5**).

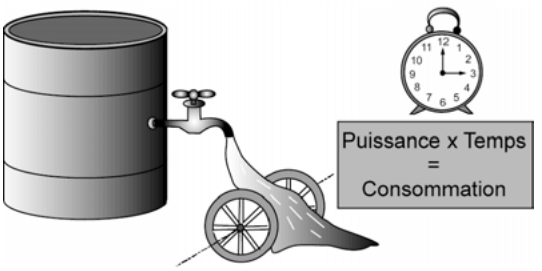


Figure 1.5.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un d

Exemple :

L'appareil de notre exemple précédent, qui consomme 0,1 A en permanence, s'il fonctionne sous une tension de 12 V, a une puissance de :

$$0{,}1 \times 12 = 1{,}2$$
$$(A)(V) = (W)$$

Il aura consommé au bout de 10 jours une énergie de :

$$1{,}2 \times 240 = 288 \qquad (W)(h) = (Wh)$$

ce qui est équivalent à :

$$24 \times 12 = 288$$
$$(Ah)(V) = (Wh)$$

Le rendement

On appelle rendement énergétique le rapport entre l'énergie réellement utilisée E_u et l'énergie fournie à l'utilisateur E_i (la différence entre ces deux quantités est en fait la perte). C'est donc le rapport entre l'énergie qui entre dans un système et celle qui en sort sous forme exploitable.

ANALOGIE

Un réservoir de 100 litres est entièrement rempli d'eau. Un tuyau est branché sur ce réservoir mais, à cause des fuites, on ne peut utiliser que 80 litres d'eau (**figure 1.6**).

Le rendement de cette installation est de 80 %.

$$\text{Rendement} = r = \frac{E_u}{E_i}, \text{ avec } r < 1.$$

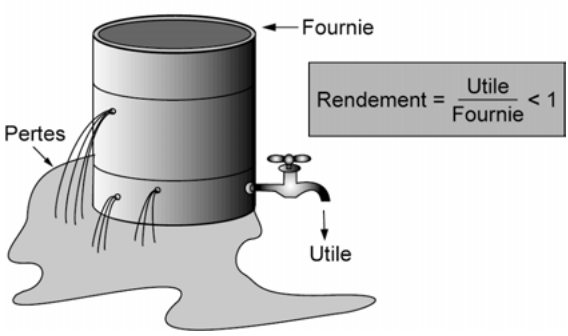


Figure 1.6.

1.2 GÉNÉRATEURS ET RÉCEPTEURS

Générateurs d'énergie

Comme leur nom l'indique, les générateurs d'énergie génèrent et donc produisent de l'énergie électrique.

Sachant néanmoins que l'énergie ne naît pas spontanément mais résulte toujours d'une transformation, certains diront qu'en théorie, le terme de *générateur* est impropre. Mais il désigne dans la pratique une source d'énergie au sens de l'usage : un générateur est donc un composant qui fournit de l'énergie à un système, comme une batterie ou un photogénérateur, et plus généralement une centrale électrique, un alternateur, une chute d'eau…

Les photogénérateurs sont des générateurs de courant continu (DC, pour *Direct Current*), par opposition aux générateurs de courant alternatif (AC). Insistons au passage sur le terme *générateur de courant*. En effet, sous un éclairement donné, le photogénérateur fournit un courant quasiment constant. Un accumulateur, lui, fournit une tension constante, c'est pourquoi c'est un générateur de tension. Nous y reviendrons au chapitre 4.

Générateurs de courant continu

Un tel générateur fournit du courant continu : tous les électrons circulent dans le même sens dans le circuit.

Les deux bornes des générateurs de courant continu ne jouent pas le même rôle. On dit qu'ils sont polarisés. Ils possèdent une borne positive et une borne négative du fait du sens de circulation du courant. Le symbole est donné sur la **figure 1.7**.

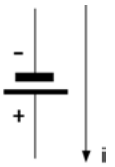


Figure 1.7.

Par convention, on dit que le courant électrique sort par la borne positive du générateur (donc en sens inverse du flux réel d'électrons).

Générateurs de courant alternatif

Un courant est dit *alternatif* lorsque les électrons circulent alternativement dans un sens, puis dans un autre du circuit, et ce, à une certaine fréquence.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Les deux bornes des générateurs de courant alternatif jouent le même rôle. Ils ne sont pas polarisés. Le symbole est donné sur la **figure 1.8**.

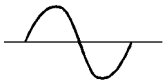


Figure 1.8.

Le temps entre deux changements de sens est la période du courant alternatif (t en secondes), $1/t$ est la fréquence du courant alternatif, elle s'exprime en *hertz*.

Exemple : EDF distribue du courant alternatif 50 Hz, donc à 50 alternances par seconde.

Récepteurs (ou consommateurs) d'énergie

Les appareils qui reçoivent, et donc consomment, le courant électrique sont appelés des *récepteurs*.

Certains appareils sont présents dans notre vie de tous les jours : ampoule, rasoir électrique, réfrigérateurs, appareils de mesure, alarmes, relais radio, etc.

Ils se différencient par le type d'énergie qu'ils utilisent : thermique (grille-pain, réfrigérateur…), mécanique (rasoir, ventilateur, moteur…) et même électrochimique quand il s'agit d'une batterie.

De même que les générateurs, ces « consommateurs » transforment l'énergie, et c'est donc en fonction de leur usage qu'ils sont appelés récepteurs : ils fournissent un service aux « consommateurs » que nous sommes.

1.3 MONTAGES SÉRIE ET PARALLÈLE

Ces montages s'appliquent aux générateurs comme aux récepteurs. Il s'agit de voir ce qui se passe lorsque l'on câble ensemble plusieurs récepteurs ou plusieurs générateurs. Les règles sont données ci-dessous.

En parallèle

Les tensions des différentes « branches » sont les mêmes et les courants s'additionnent :

$$U_1 = U_2$$

$$I = I_1 + I_2$$

Exemple : 2 ampoules en parallèle alimentées par une pile (**figure 1.9**).

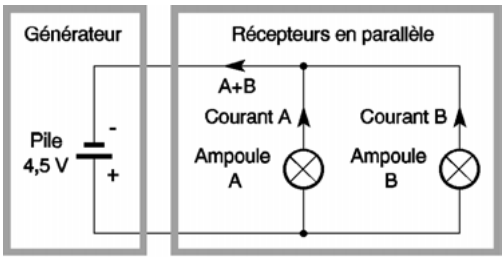


Figure 1.9.
Récepteurs en parallèle.

Chaque ampoule a une tension nominale de 4,5 V et une puissance de 1 W.

$$I = 1/4{,}5 = 0{,}22 \text{ A}$$

Le courant passant dans chaque ampoule est de 0,22 A, le courant consommé sur la pile est de :

$$I = 2 \times 0{,}22 = 0{,}44 \text{ A}$$

La tension est la même aux bornes de chaque composant.

En série

Les courants sont les mêmes et les tensions s'additionnent :

$$I_1 = I_2$$

$$U = U_1 + U_2$$

Exemple : 2 ampoules en série alimentées par une pile (**figure 1.10**).

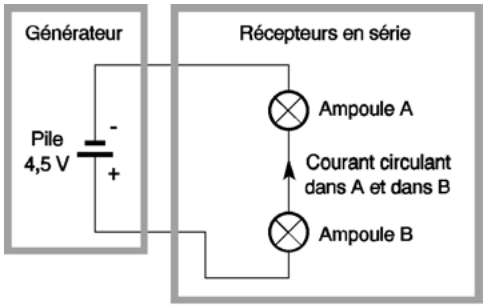


Figure 1.10.
Récepteurs en série.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Ampérage

Chaque ampoule a une puissance de 1 W et une tension nominale de 2,25 V :

$$P = UI$$

d'où :

$$I = P/U$$

$$1/2{,}25 = 0{,}44 \text{ A}$$

Le courant passant dans les ampoules A et B est de 0,44 A. Le courant fourni par le générateur est de 0,44 A.

Tension

La tension aux bornes de A et B est de $2 \times 2{,}25$ V, soit 4,5 V, tension que fournit le générateur.

2 ENSOLEILLEMENT ET LUMIÈRE

2.1 QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

Un peu de physique

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou *photons*, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique.

Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

Couleur et longueur d'onde

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquences radio, micro-ondes…

Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, et propres au développement de la vie.

Regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre : l'infrarouge procure de la chaleur, le visible est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie, s'il est besoin de le préciser), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3 µm (= 3 000 nm) (*cf.* figure 2.4).

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer « ultraviolette » la lumière plus bleue que le bleu-violet

perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380 nm) au rouge (longueur d'onde 780 nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche.

On réalise la même décomposition avec un prisme (**figure 2.1**).

On appelle *spectre*, ou *répartition spectrale*, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent.

Une lumière rouge est une portion de lumière blanche, de même qu'une lumière bleue ou orange. Les lampes artificielles les plus courantes, quoique blanches à l'œil, diffèrent par leur spectre (voir section 2.3).

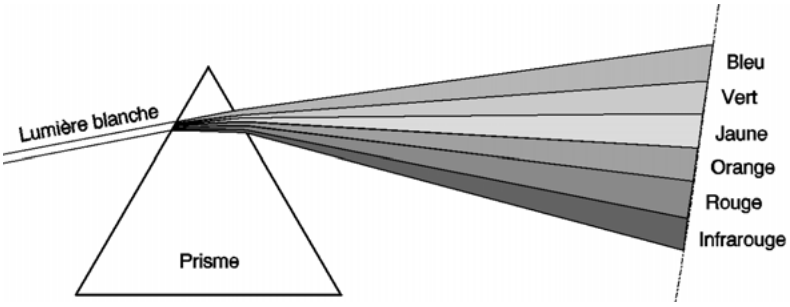


Figure 2.1.
Décomposition de la lumière blanche par un prisme.

Que voit la photopile ?

Nous décrirons dans le chapitre 3 les différents types de photopiles, mais précisons dès à présent qu'elles se différencient par leur sensibilité spectrale, ou capacité à convertir certaines longueurs d'onde.

Les photopiles au silicium amorphe ont une sensibilité spectrale très proche de celle de l'œil (**figure 2.2**). Ainsi, le silicium amorphe est particulièrement bien adapté en éclairement intérieur car les tubes néon et fluorescents ont un spectre d'émission qui est prévu pour l'œil humain.

Les photopiles au silicium cristallin sont destinées à un usage extérieur sous fort ensoleillement, à cause de leur sensibilité plus grande au proche infrarouge et de leur médiocre comportement dans le bleu.

Pour clore cet exposé un peu théorique, récapitulons les ondes connues avec leurs fréquences et longueurs d'onde dans le **tableau 2.1**.

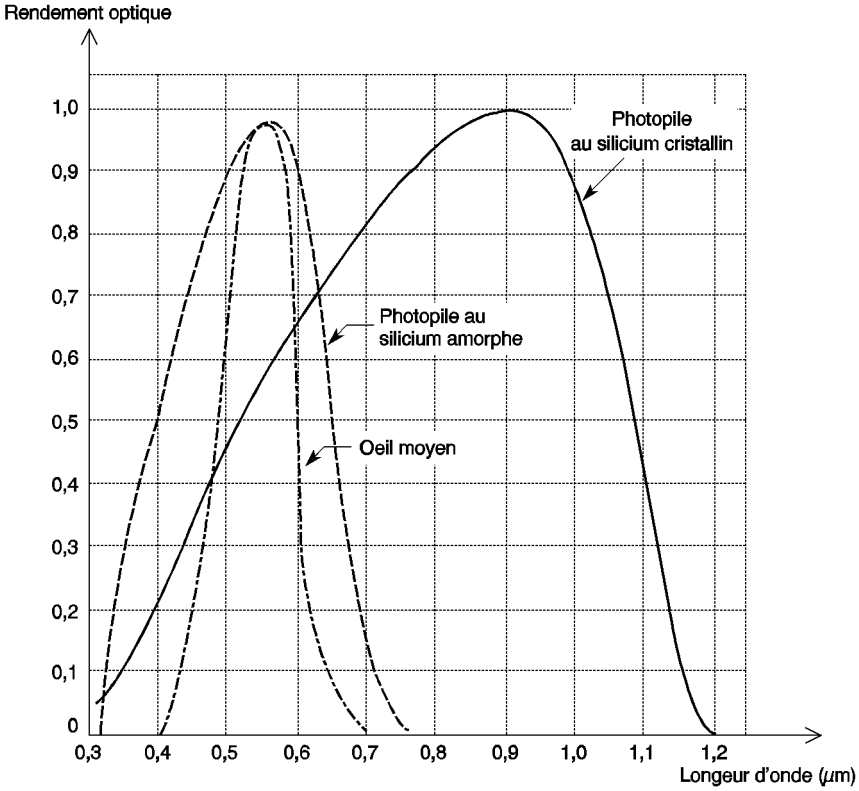


Figure 2.2.
Réponse spectrale des photopiles et sensibilité de l'œil humain.

Tableau 2.1.
Principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages.

Type d'onde	Longueur d'onde	Fréquence	Usages
Ondes radio	> 1 mm	$< 3 \times 10^{11}$ Hz	Radio, TV, radars
Infrarouge	1 mm à 0,8 µm	3×10^{11} à 4×10^{14} Hz	Vision nocturne, télécommandes
Lumière visible	0,8 à 0,4 µm	$3{,}7 \times 10^{14}$ à $7{,}5 \times 10^{14}$ Hz	Vision diurne, photosynthèse
Ultraviolet	0,4 à 0,05 µm	$7{,}5 \times 10^{14}$ à 6×10^{15} Hz	Bronzage, purification de l'eau
Rayons X	0,05 µm à 10^{-2} Å	6×10^{13} à 3×10^{20} Hz	Radiographie
Rayons gamma	$< 10^{-2}$ Å	$> 3 \times 10^{20}$ Hz	–

EN SAVOIR PLUS

µm = micromètre : 1 µm = 10^{-6} m, 1 000 µm = 1 mm
nm = nanomètre : 1 nm = 10^{-9} mm, 1 000 nm = 1 µm
Å = angström : 1 Å = 10^{-10} m, 10 000 Å = 1 µm
Hz = hertz : 1 Hz = 1/1 s = s^{-1}

2.2 LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Énergie naturelle par excellence, le Soleil, cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5 500 °C, nous dispense chaleur et lumière. Centre de notre système planétaire, sa place est si grande dans l'activité terrestre sous toutes ses formes qu'il fut bien souvent objet d'adoration.

Source indirecte des énergies usuelles de notre temps (sous forme chimique et biochimique en particulier), ce n'est qu'au XVII^{e} siècle que l'on songea à utiliser directement le Soleil à des fins techniques : Lavoisier a, l'un des premiers, employé une lentille convergente de 1,30 m de diamètre pour obtenir la fusion d'un morceau de fer placé à son foyer.

Ce n'est qu'en 1954 que les premières piles solaires produisant de l'électricité firent leur apparition, grâce aux travaux de Bell Laboratories (États-Unis).

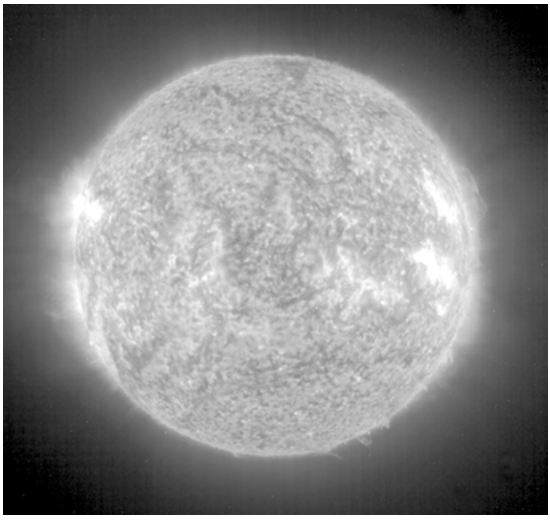


Figure 2.3.
Le Soleil (document SOHO-EIT/ ESA-NASA).

On se reportera aux ouvrages cités en bibliographie pour tout savoir sur le Soleil : sa course, ses positions par rapport à la Terre et tous les paramètres physiques qui en découlent.

Nous nous contenterons ici de décrire les plus intéressants et utiles à l'exploitation du rayonnement solaire par les photogénérateurs.

Rayonnement solaire et atmosphère

La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s ; les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

La *constante solaire* est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1 360 W/m^2 (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil).

EN SAVOIR PLUS

Le watt par m^2 (W/m^2) est l'unité la plus utilisée pour quantifier le rayonnement solaire. C'est un flux, une puissance par unité de surface. 1 W/m^2 est aussi égal à 1 Joule par seconde et par m^2 puisque 1 W = 1 J/s. Ici l'énergie est électromagnétique, mais les unités sont les mêmes que pour une énergie électrique (voir section 1.1, La consommation électrique).

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1 360 W/m^2 subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée.

En effet, si l'on fait face au Soleil, on le voit à une certaine hauteur, qu'on appelle *hauteur apparente*. C'est l'angle *h* entre le plan horizontal situé sous nos pieds et une droite pointée vers le Soleil.

On voit bien sur la **figure 2.4** que cet angle *h* détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère et donc les pertes engendrées.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

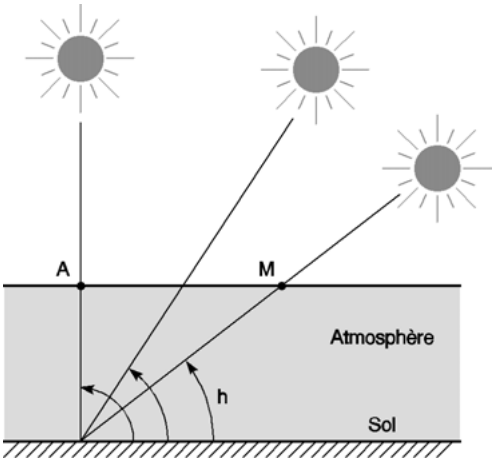


Figure 2.4.
Définition de l'*Air Mass* : $m = 1/\sin(h)$

On appelle m (masse atmosphérique), ou *Air Mass*, cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu.

Sur notre figure, $m = 1$ si le Soleil entre dans l'atmosphère au point A, et $m = 2$ s'il y entre en M, donc :

$$m = 1/\sin(h)$$

Quant aux conditions normalisées de test des panneaux solaires, elles sont caractérisées par un rayonnement instantané de 1 000 W/m², un spectre solaire AM 1,5 et 25 °C de température ambiante. Ces conditions sont appelées STC (*Standard Test Conditions*). La **figure 2.5** montre ce spectre AM 1,5 normalisé : les « trous » que l'on observe correspondent aux absorptions par les gaz de l'atmosphère.

Cela correspond à un ensoleillement assez fort, soleil au Zénith (au plus haut de sa course), ciel parfaitement dégagé (sur la plage à Nice, au printemps). Ce n'est pas très représentatif, en tout cas dans notre zone tempérée, souvent riche en nuages.

La **figure 2.6** nous montre l'influence de cette couverture nuageuse sur le rayonnement reçu sur la Terre. Notons au passage la différence entre le rayonnement *direct*, les rayons du soleil qui nous parviennent en ligne droite, et le rayonnement *diffus*, les rayons qui subissent de multiples réflexions et nous parviennent alors de toutes les directions à travers les nuages. Le rayonnement solaire est entièrement diffus lorsqu'on ne peut plus voir où se trouve le soleil. Quant au rayonnement *global*, c'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

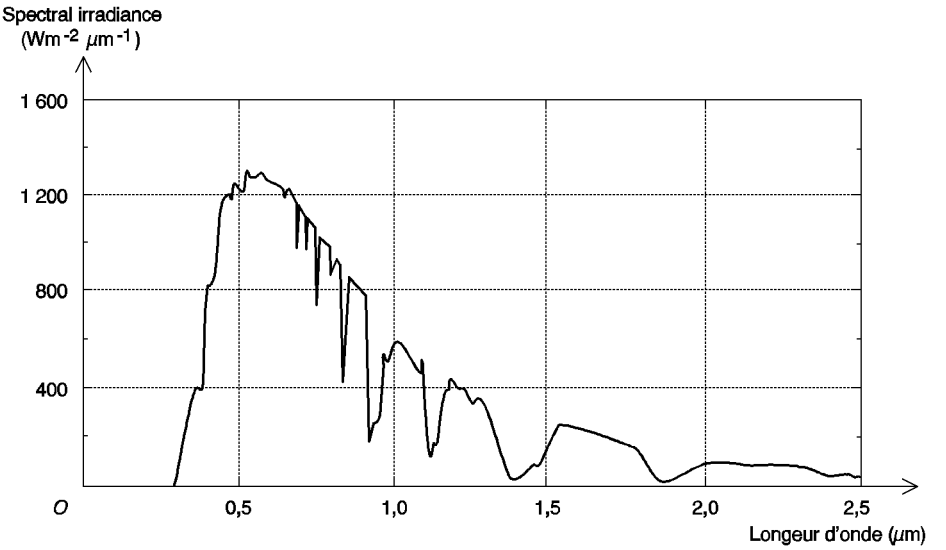


Figure 2.5.
Spectre solaire AM 1,5 normalisé.

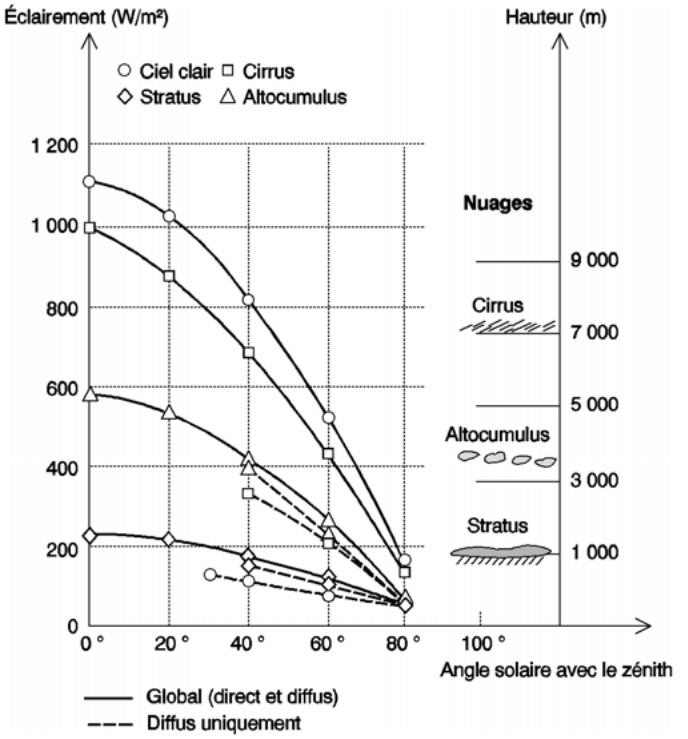


Figure 2.6.
Influence des nuages sur le rayonnement solaire.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Pour résumer, le soleil dispense typiquement à un instant *t* sur la terre (en rayonnement global) :

- 1 000 W/m^2 avec un soleil au zénith et un ciel parfaitement dégagé ;
- 100-500 W/m^2 sous un ciel nuageux ;
- moins de 50 W/m^2 sous un ciel vraiment couvert.

Remarque sur la norme STC : ce graphe montre bien que cette norme impose des conditions de mesure des panneaux qui ne sont pas du tout réalistes, car l'ensoleillement est presque toujours inférieur à 1 000 W/m^2. Et l'imperfection de cette norme va plus loin puisque le panneau doit être mesuré également à 25 °C, ce qui est carrément incompatible avec l'ensoleillement élevé de 1 000 W/m^2 dans la réalité. Sous un tel ensoleillement, le panneau s'échauffe forcément, jusqu'à 40, 60 °C et parfois plus (selon la manière dont il est construit, et ventilé).

Malheureusement c'est bien à 1 000 W/m^2 et 25 °C que sont comparées les technologies, ce qui déprécie celles qui sont performantes à éclairement moyen ou moins sensibles aux élévations de température. Le silicium en couche mince notamment, toujours mal considéré, est meilleur aux éclairements faibles et diffus, et il baisse moins que le cristallin quand la température augmente. Aujourd'hui, il est prouvé qu'en Europe en tout cas, et semble-t-il aussi sous climat très chaud, l'énergie totale annuelle produite par des panneaux au silicium amorphe est supérieure à celle des panneaux au silicium cristallin, pour une même puissance installée. Tout simplement parce que l'ensoleillement est en moyenne bien inférieur à 1 000 W/m^2 et la température du panneau supérieure à 25 °C. Voir au chapitre 3 les différentes technologies.

Lieu géographique, orientation, saison, heure de la journée, etc. jouent directement sur le rayonnement instantané. C'est ce qui déroute bien souvent les utilisateurs pour définir leurs systèmes solaires. L'énergie délivrée par un panneau solaire est hautement variable !

L'éclairement instantané n'est d'ailleurs pas très utile, on se servira plutôt de valeurs globales intégrées sur une journée pour chiffrer l'énergie récupérable.

Rayonnement intégré

Il faut bien distinguer le *rayonnement instantané* (en W/m^2), appelé aussi *éclairement*, qui est un flux lumineux reçu à un moment donné, et le *rayonnement intégré* (ou cumulé) (en Wh/m^2 ou kWh/m^2), qui est l'énergie totale disponible pendant un

certain temps. En général, cette période de base est de 24 h : on parle alors de Wh/m²·jour (watts-heure par m² et par jour). On obtient cette énergie globale en multipliant le rayonnement instantané par le temps. Pour un rayonnement variable, c'est l'intégrale du rayonnement sur le temps considéré.

Exemple de calcul

Observons le schéma approché d'une journée d'ensoleillement, représenté sur la **figure 2.7**, pour mieux saisir ces notions. Dans le **tableau 2.2**, on reporte la décomposition dans le temps et le total en Wh/m² sur cette journée.

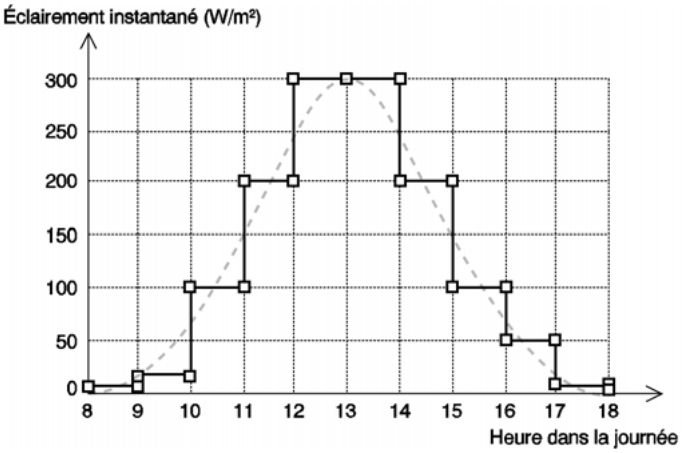


Figure 2.7.
Exemple simplifié d'une journée d'ensoleillement.

Horaire	W/m²	Durée (h)	Résultat (Wh/m²)
8 h à 9 h	5	1	5
9 h à 10 h	20	1	20
10 h à 11 h	100	1	100
11 h à 12 h	200	1	200
12 h à 14 h	300	2	600
14 h à 15 h	200	1	200
15 h à 16 h	100	1	100
16 h à 17 h	50	1	50
17 h à 18 h	5	1	5
Total	1 280 Wh/m²·jour		

Tableau 2.2.
Décomposition de la journée d'ensoleillement.

Les détails des rayonnements globaux intégrés réels sont connus, dans la pratique, grâce aux statistiques fournies par les stations météorologiques de différents pays.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Pour tout calcul d'une application en extérieur, on utilisera la *valeur moyenne du rayonnement global reçu pendant une journée* (en Wh/m^2·jour), et cela en fonction :

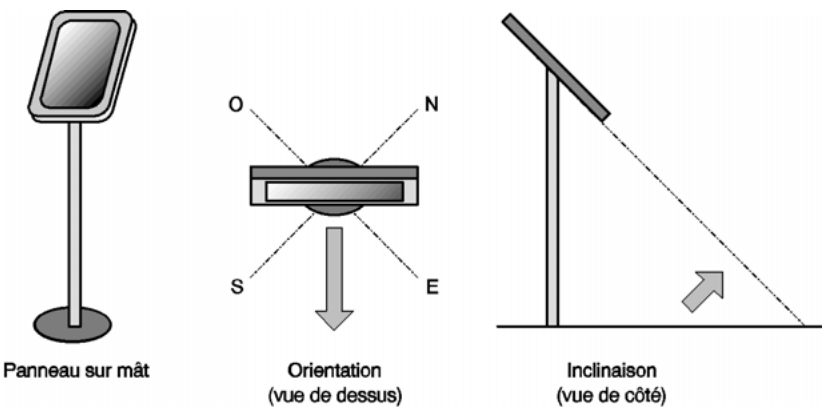
- du lieu géographique ;
- du mois de l'année ;
- de l'orientation (sud, sud-est, nord…) ;
- de l'inclinaison (angle du panneau : vertical, horizontal).

Orientation et inclinaison

Une question vient immédiatement à l'esprit après cet exposé : comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer ?

On doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison (**figure 2.8**). L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest… tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal

Figure 2.8.
Inclinaison et orientation d'un panneau solaire. Ce panneau est incliné à 60° par rapport à l'horizontale et orienté au S-E.



Étant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs « suiveurs », mais ils consomment une part de l'énergie, sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration munis de cellules à haut rendement (voir section 5.2) et pour des rayonnements directs uniquement (sud de l'Europe, États-Unis, Afrique…).

Dans l'hémisphère Nord, le soleil suit chaque jour une trajectoire apparente Est-Sud-Ouest, donc l'orientation idéale est vers le Sud. Dans l'hémisphère Sud au contraire, c'est vers le Nord. On retient donc la *règle suivante* pour l'orientation idéale : vers l'Équateur.

L'inclinaison idéale des panneaux, elle, dépend bien entendu de la hauteur du soleil pendant la période d'utilisation : plus le soleil est bas sur l'horizon, plus on aura intérêt à relever les panneaux vers la verticale pour les placer face au soleil. Donc l'inclinaison idéale dépend directement de la période de l'année qu'on veut privilégier, et donc de l'utilisation des panneaux, du but recherché.

Optimisation de la production minimale de l'année

Parfois on cherche à produire le plus possible d'énergie solaire dans les périodes les moins ensoleillées pour assurer un fonctionnement minimal hiver comme été, pour une consommation constante ou plus élevée en hiver qu'en été (un éclairage urbain par exemple). Dans ce cas, il vaut mieux placer le panneau en position « hiver » très relevée à la verticale, pour produire le plus possible avec des soleils bas. Cette position est fonction de cette hauteur du soleil en hiver et donc de la latitude du lieu.

La règle est simple dans ce cas : latitude du lieu + 10°. En France, on adopte généralement dans ce cas l'inclinaison de 60° par rapport à l'horizontale.

Optimisation de la production totale de l'année

Les générateurs raccordés au réseau dont le courant est revendu à la compagnie d'électricité ne répondent pas à la même exigence. Dans ce cas, il est intéressant de produire le plus possible au total, sur une année entière. Donc la position des panneaux doit permettre de collecter surtout la production d'été qui est nettement plus abondante que celle d'hiver, en tout cas sous nos latitudes européennes.

L'inclinaison idéale des panneaux est en France autour de 25°-30° par rapport à l'horizontale, toujours en orientation Sud.

Ces emplacements optimisés ne sont pas non plus une règle absolue. Ils se justifient surtout lorsque le rayonnement solaire est direct (non diffusé par les nuages, *cf.* section 2.1) et pour des panneaux qui convertissent au mieux ce type de rayonnement, c'est-à-dire les panneaux au silicium cristallin.

Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus. Le chapitre 3 détaille ces différents matériaux de panneaux solaires.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Rayonnement exploitable

Le **tableau 2.3** donne quelques valeurs utilisables extraites de l'*Atlas du Rayonnement Solaire Européen*. Véritable base de données composée de statistiques sur 10 ans effectuées par de nombreuses stations météorologiques européennes, cet ouvrage donne les valeurs moyennes intégrées sur une journée, pour chaque mois de l'année et pour diverses orientations et inclinaisons, du rayonnement diffus et global.

Tableau 2.3. Orientation Sud. Inclinaison 60° par rapport à l'horizontale (valeurs en kWh/m²·jour).

Site	Décembre	Mars	Juin	Septembre
Ostende (Nord)	0,96	3,21	4,69	3,83
Paris	1,12	3,23	4,43	3,98
Mâcon	1,25	3,55	4,63	4,49
Nice	3,76	4,79	5,11	5,26

Par exemple, à Ostende en décembre, avec 0,96 kWh/m².jour < 1 kWh/m².jour, on ne dispose même pas de l'équivalent de 1 heure à 1 000 W/m², alors qu'à Nice en septembre, on en a plus de 5.

Nous utiliserons ces données aux chapitres 5 et 7 pour calculer les besoins en panneaux solaires d'une application.

Sur Internet on trouve aussi des bases de données de rayonnement solaire, par exemple en complément des logiciels de dimensionnement comme PVSYST, ARCHELIOS, ou METEONORM. Ces derniers nécessitent un abonnement payant, mais pas le Canadien RETSCREEN, et la base européenne SATEL-LIGHT, accessibles à tous. Il n'en reste pas moins que ces logiciels sont assez complexes et demandent souvent une formation pour bien savoir les utiliser.

2.3 LES SOURCES DE LUMIÈRE ARTIFICIELLES

Oui, *l'énergie lumière* signifie bien ceci : toute lumière peut être convertie en électricité. Le soleil n'est pas, de loin, la seule source d'énergie lumière. Les photopiles sous lumière artificielle fonctionnent exactement comme des panneaux exposés au soleil, à ceci près que les flux lumineux étant généralement moins intenses, les puissances générées sont plus modestes. Car, si le soleil est source de lumière, l'intelligence de l'homme, avec entre autres sa découverte de la fée électricité, lui a permis de s'éclairer et de se chauffer en son absence.

Flammes, lampes et faisceaux en tout genre sont sources de lumière, dont l'énergie peut être convertie par les photogénérateurs.

Nous avons vu, à la section précédente, la manière dont la lumière du soleil se décompose en couleurs, c'est-à-dire en longueurs d'onde. Il en est de même pour les sources artificielles.

Généralement blanches pour le confort de l'utilisateur, elles se différencient entre elles par leur spectre (répartition en longueurs d'onde).

En fait, il existe 4 types de sources de lumière artificielles :

- les sources *thermiques* utilisent la chaleur pour émettre un rayonnement : lampes à incandescence classiques, lampes halogènes, flammes, bougies… Leur spectre est dit « continu » car l'émission est assez voisine d'une longueur d'onde à l'autre. En les assimilant à des *corps noirs* (ou sources thermiques idéales), on leur assigne une *température de couleur* exprimée en kelvins, qui caractérise leur répartition spectrale. Plus cette température est élevée, plus la source est bleutée. Par exemple, la température de couleur d'une lampe à incandescence est de 2 500 K, celle d'une lampe halogène de 3 400 K *(cf.* **figure 2.9**), et celle de la lumière du jour (en photographie) de 5 500 K ;

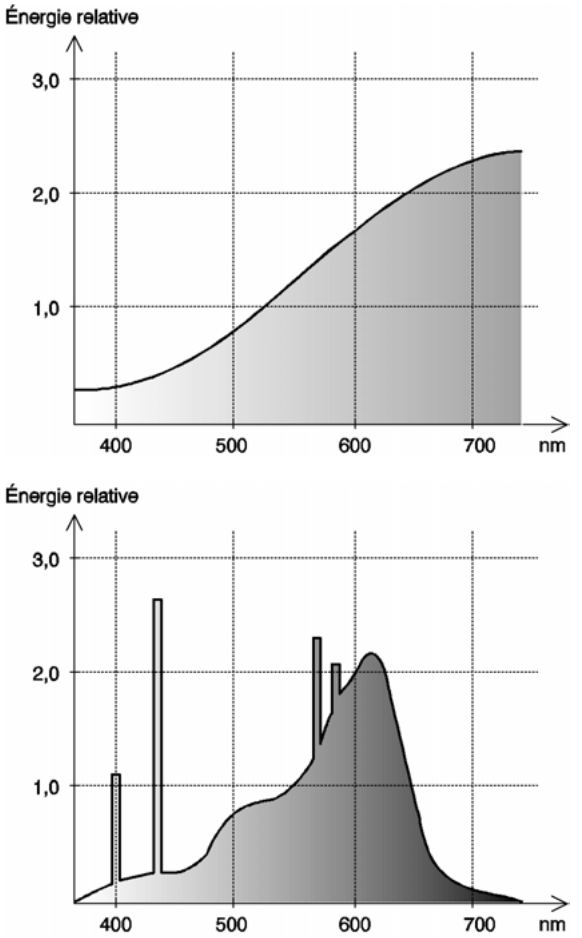


Figure 2.9.
a. Spectre d'une lampe halogène
b. Spectre d'un tube fluorescent type *Warm white*.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

- les sources *à décharge* dans un gaz ionisé ont un spectre présentant de nombreux « trous », dans lesquels aucune énergie lumineuse n'est émise (spectre discontinu). C'est le cas notamment des lampes à vapeur de mercure ;
- les sources *à spectre combiné* sont des sources à décharge électrique modifiées qui combinent spectre continu et spectre discontinu. C'est le cas des tubes fluorescents (*cf.* **figure 2.9**) ;
- les sources *à spectre de raies*, comme les lasers ou les diodes lasers, n'émettent que dans quelques longueurs d'onde, et avec un filtre, on arrive à en faire des sources monochromatiques (c'est-à-dire à une seule couleur ou longueur d'onde).

Mesures d'éclairement d'une source artificielle

Quand il s'agit de *lumière artificielle*, on utilise plus généralement le « lux », unité directement en rapport avec notre perception physiologique de la lumière que nous évoquions plus haut. Quel intérêt pour un éclairage à l'usage de l'homme d'émettre des longueurs d'onde que ce dernier ne voit pas ? Le *lux*, ou éclairement perceptible par l'œil, représente donc le flux lumineux d'une source qui est contenu dans la gamme 380-780 nm de notre œil, selon la courbe pointillée de la **figure 2.2**.

Cette unité peut également servir pour le rayonnement global solaire, voici les principaux ordres de grandeurs :

– 10 lux = pénombre ;

– 100 lux = minimum de visibilité pour lire un texte normal ;

– 1 000 lux = local très bien éclairé (au voisinage d'une fenêtre) ;

– 10 000 lux = temps extérieur moyen ;

– 20 000 lux = éclairage artificiel intense (à proximité d'une lampe halogène 50 W par exemple) ;

– 100 000 lux = temps extérieur très ensoleillé.

La **figure 2.10** visualise ces niveaux d'éclairement.

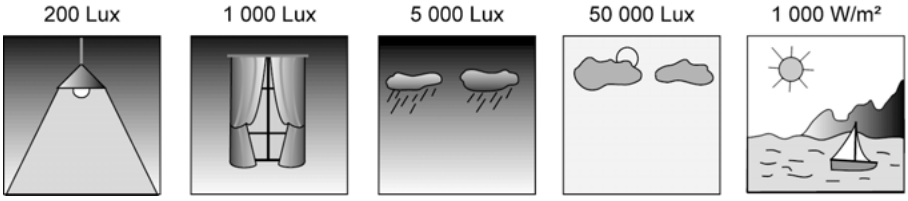


Figure 2.10.
Pictogrammes d'éclairement.

L'éclairement en lux s'évalue à l'aide d'un luxmètre, dans lequel l'élément essentiel est une photodiode dont la sensibilité spectrale coïncide avec celle de l'œil moyen (voir le montage proposé à la section 6.3).

Quelle est la correspondance entre les lux et les watts/m² ?

Pour conclure ce chapitre, une question intéressante que beaucoup se posent : quelle est la correspondance entre les lux et les watts par mètre carré ? Impossible de le déterminer sans connaître le spectre de la source.

En effet, un flux de 1 000 W/m² peut ne contenir aucun lux s'il s'agit, par exemple, d'infrarouge lointain hors de la zone visible 380-780 nm. Ces mêmes 1 000 W/m², s'ils proviennent du soleil, selon le spectre normalisé AM 1,5 à 25 °C (voir section 2.2) contiennent entre 100 000 et 112 600 lux selon le mode de calcul.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

3 CELLULES ET PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Nous allons maintenant tenter de comprendre comment est produite l'électricité à partir de la lumière, et comment sont fabriqués les photogénérateurs.

Chacun sait que : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Convertir l'énergie lumineuse en électricité, telle est la fonction d'une *photopile* ou d'une *cellule solaire*.

Tous les photogénérateurs sont donc des transformateurs d'énergie qui, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, produisent de l'énergie électrique.

3.1 CONVERSION DE LA LUMIÈRE EN ÉLECTRICITÉ

La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Qu'est-ce que la *photoconductivité* d'un semi-conducteur ?

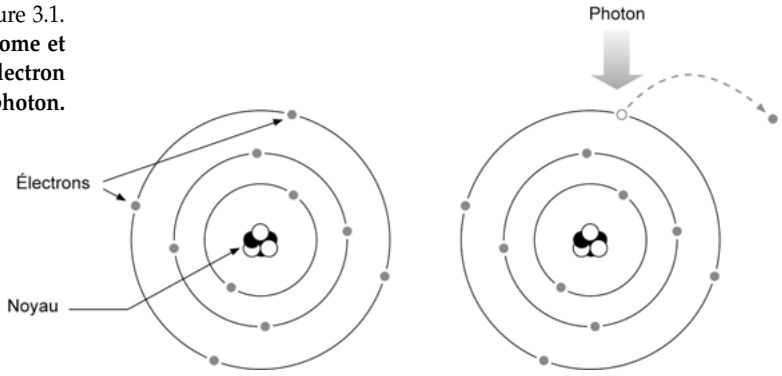


Figure 3.1.
Structure d'un atome et extraction d'un électron par un photon.

Rappelons tout d'abord les deux points suivants :

- Toute matière est faite d'atomes comportant des électrons (charges négatives élémentaires) qui gravitent autour d'un noyau (voir **figure 3.1**).

- Un courant électrique est une circulation d'électrons.

Dans un *isolant électrique*, les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.

Dans un *conducteur électrique* (un fil de cuivre par exemple), les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.

Dans un *semi-conducteur*, la situation est intermédiaire : les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ses photons apportent une énergie permettant aux électrons de se libérer et de se déplacer dans la matière, il y a donc courant électrique sous exposition à la lumière (voir **figure 3.1**).

Le semi-conducteur le plus utilisé est disponible en quantité incalculable à la surface de la Terre, puisque présent dans le sable sous forme de silice et de silicates : il s'agit du silicium (Si). C'est ce silicium qui compose les circuits intégrés, utilisés massivement dans l'électronique.

Pour simplifier, un photogénérateur est donc physiquement une tranche de silicium que l'on prend en sandwich entre deux électrodes métalliques (+) et (–) pour collecter le courant produit.

Mais pour « attirer » ces électrons vers les électrodes, il faut une force interne.

On comprend cette nécessité en repensant à la chute d'eau : la gravitation terrestre entraîne l'eau vers le sol, créant ainsi un débit et donc de l'énergie. Ce n'est pas l'eau elle-même qui est source d'énergie mais son déplacement.

Dans un photogénérateur, c'est en créant une différence de potentiel entre ses bornes que l'on permet la circulation du courant. Et c'est le « dopage » des parties avant et arrière de la « tranche » de silicium qui va permettre l'apparition de cette différence de potentiel :

- dopage de type p sur une face, par adjonction d'atomes de bore (B), contenant moins d'électrons périphériques par atome que le silicium ;
- dopage de type n sur l'autre face, par adjonction d'atomes de phosphore (P), contenant plus d'électrons périphériques par atome que le silicium.

On obtient ainsi une « jonction » possédant un champ électrique interne pour entraîner vers le circuit extérieur les charges électriques libérées sous illumination.

D'un point de vue électronique, un photogénérateur est donc une jonction p-n ou p-i-n (parfois, on ajoute une couche intrinsèque, c'est-à-dire non dopée entre la couche p et la couche n) réalisée dans un semi-conducteur absorbant dans le spectre visible.

3.2 ANATOMIE D'UN PHOTOGÉNÉRATEUR

Comment les photogénérateurs sont-ils réalisés pratiquement ?

Photogénérateur au silicium cristallin

Le silicium peut être à l'état massif, il est dit dans ce cas *cristallin*, du fait de sa structure ordonnée. Il est produit sous forme de barreaux purifiés, de section ronde ou carrée, qui sont ensuite découpés en plaquettes d'environ 0,2 mm d'épaisseur, de dimensions 12 × 12 ou 15 × 15 cm par exemple (**figure 3.2**).

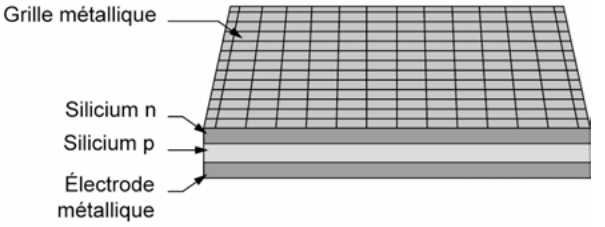


Figure 3.2. **Schéma d'une photopile au silicium cristallin.**

Selon la technologie employée, ce silicium cristallin peut être :

- monocristallin : les photopiles sont formées d'un seul cristal ordonné. Ce matériau est fabriqué en barreaux étirés à partir d'un germe, ou recristallisés à haute température ;
- poly (ou multi) cristallin : il est constitué de cristaux de 1 mm à environ 2 cm assemblés, appelés « grains ». Ce matériau, moins onéreux, est élaboré dans de grands creusets industriels par fonte et refroidissement de blocs de silicium purifié.

Dans les deux cas, le silicium est ensuite découpé en tranches par des scies à fil.

Sur ces plaquettes (*wafers*), on réalise alors l'incorporation des dopants par des techniques de diffusion ou d'implantation sous vide. Puis, le silicium est couvert d'une couche anti-reflet en face avant, qui réduit à moins de 5 % les pertes par réflexion de la lumière incidente, et qui lui donne une couleur bleu foncé, caractéristique des photogénérateurs au silicium cristallin.

Le dessus et le dessous de la plaquette doivent ensuite être couverts de contacts métalliques pour collecter l'électricité générée. Pour laisser passer la lumière, l'électrode avant est déposée sous forme de grille, l'arrière étant simplement recouvert d'une couche métallique continue.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

La photopile est alors opérationnelle.

Cependant, sa faible tension de fonctionnement (autour de 0,6 V sous 1 000 W/m^2) la rend peu utilisable dans la pratique, et il convient d'en monter plusieurs en série pour augmenter cette tension (voir chapitre 2 sur les montages série et parallèle).

On place alors les photopiles élémentaires entre deux supports (généralement en verre) après les avoir reliées entre elles en série par des fils conducteurs extra-plats (voir **figure 3.3**).

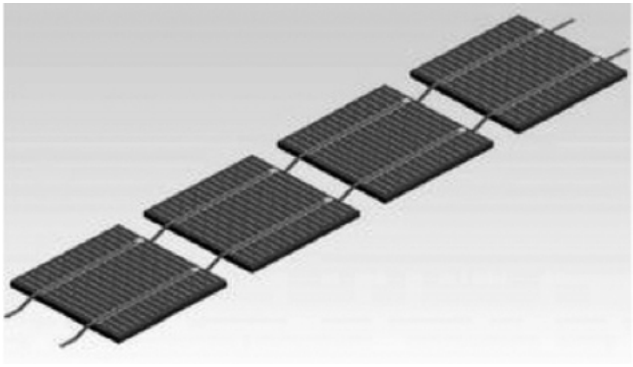


Figure 3.3.
Mise en série de structures cristallines (crédit ECN).

À l'aide d'une résine d'assemblage pour joindre les deux supports (faite à base d'éthyl-vinyle acétate) au cours d'une opération dite *encapsulation*, essentielle pour la protection contre les intempéries, on constitue ainsi un panneau solaire avec sortie par câble ou boîte à bornes, prêt à l'emploi.

Typiquement, un panneau de 0,5 m^2, avec trente-six cellules de 100 cm^2, produit 60 W_c sous 15 V lorsqu'il est exposé à 1 000 W/m^2.

On remarquera que la photopile en silicium cristallin est assez fragile et nécessite systématiquement une encapsulation, au moins pour le renfort mécanique. Cela va de pair avec son usage exclusivement en milieu extérieur, qui s'explique par ses bonnes performances au soleil.

Il n'en est pas de même pour le silicium amorphe, qui est employé en extérieur et en intérieur (donc en éclairage naturel et artificiel) avec divers degrés de protection.

Photogénérateur au silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, c'est-à-dire non cristallisée, ou *vitreuse*.

Cependant, il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ mille fois supérieur à celui du silicium cristallin. Une fine couche de 0,3 µm (= 0,0003 mm) est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible.

Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur une plaque de verre, à partir du gaz silane SiH_4 (qui constitue la matière première).

Les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide. Puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence. Le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène (H) est également nécessaire pour la qualité du matériau (il limite le nombre de défauts, en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée).

L'adjonction des dopants (pour réaliser les couches p et n, voir ci-dessus) est réalisée par ajout de gaz PH_3 (phosphine) ou B_2H_6 (diborane) au silane.

En pratique, le verre comporte, sur la face où l'on dépose le silicium, une couche mince transparente et conductrice faite d'oxyde d'étain (SnO_2) servant d'électrode (+). L'électrode arrière est produite par un dépôt métallique sur le silicium.

La mise en série est réalisée au cours de la fabrication des couches par un astucieux découpage au laser des différentes couches, permettant de mettre en contact l'électrode (–) d'une photopile avec l'électrode (+) de la suivante.

Cette technique présente l'avantage de pouvoir être réalisée même sur de très petits formats.

Les photogénérateurs au silicium amorphe (**figure 3.4**) sont donc susceptibles de générer à moindre coût des tensions de 3, 6 ou 12 V, même sur des petites surfaces (de quelques centimètres carrés à quelques décimètres carrés).

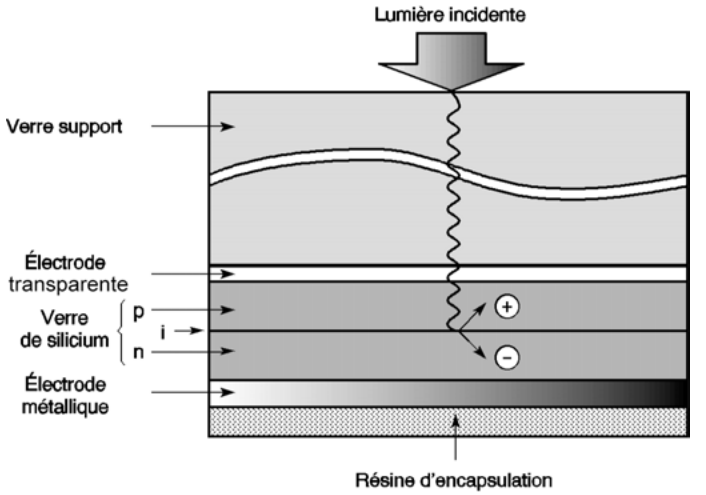


Figure 3.4.
Principe d'une photopile au silicium amorphe.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

La **figure 3.5** présente le principe de mise en série dans un photogénérateur au silicium amorphe.

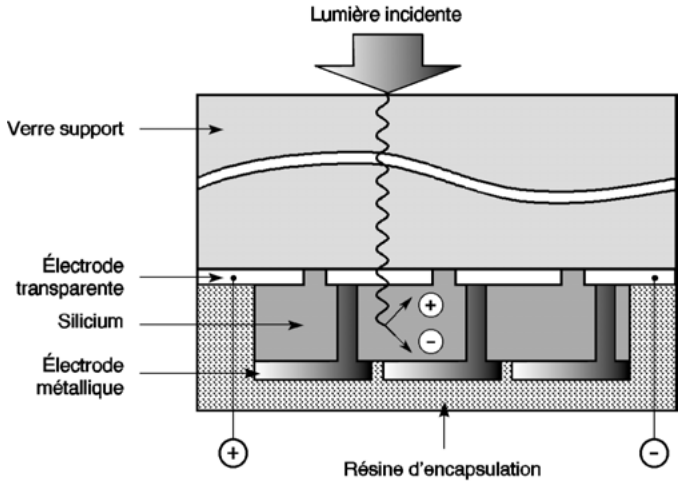


Figure 3.5. **Principe de mise en série dans un photogénérateur au silicium amorphe.**

3.3 FONCTIONNEMENT ÉLECTRIQUE D'UN PHOTOGÉNÉRATEUR

Comme il a été dit à la section précédente, un photogénérateur débite un certain courant, sous une différence de potentiel (ou « tension » en langage courant).

Nous allons décrire ici cette relation courant-tension (**figure 3.6**) qui conditionne le fonctionnement électrique du photogénérateur et son couplage avec un récepteur.

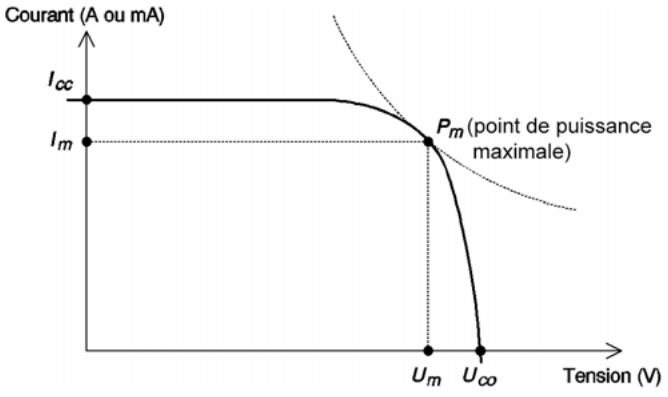


Figure 3.6. **Courbe courant-tension d'un photogénérateur.**

U_{co} : Tension de circuit ouvert

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite *tension de circuit ouvert* U_{co} ou tension à vide.

On la mesure à l'aide d'un voltmètre (voir montage de la section 7.1). Cette tension est de l'ordre de 0,7 V pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairement). Un photogénérateur étant une association de cellules élémentaires, la tension à vide U_{co} sera typiquement égale à :

$$U_{co} = n \times 0{,}7 \text{ V}$$

où n est le nombre de cellules. Par exemple, $U_{co} = 4{,}2$ V si $n = 6$ cellules en série.

La tension maximale que cette photopile peut délivrer sous l'éclairement considéré est de 4,2 V. Mais, dans cet état, la photopile ne débite aucun courant et ne peut alimenter aucun récepteur. C'est sous une tension inférieure que la photopile sera utilisée, afin qu'elle débite tension **et** courant pour alimenter le récepteur.

I_{cc} : Courant de court-circuit

À l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place le photogénérateur en court-circuit, il débite son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre (*cf.* section 7.1).

On appelle ce courant maximal à tension nulle *courant de court-circuit*.

P_m : Point de puissance maximale

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal.

En effet, suivant la formule $P = UI$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit UI est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m (*cf.* **figure 3.6**).

On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point $P_m = U_m \cdot I_m$.

Puissance-crête et rendement

La puissance maximale est fonction de l'éclairement. Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1 000 W/m^2, 25 °C, spectre solaire AM 1,5, voir section 2.2), on parle alors de *watts-crête* (W_c) ou de *puissance-crête*.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Le rendement d'un photogénérateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photogénérateur (voir les rappels de la section 1.1) :

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S}$$

$$= \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{W/m^2} \cdot \mathrm{m^2}}$$

où S est la surface du photogénérateur.

On peut calculer ce rendement pour différents éclairements, mais le plus souvent, c'est dans les conditions STC qu'il est donné. On le calcule donc avec la puissance crête :

$$\eta = \frac{P_c}{1\,000 \cdot S}$$

Exemple de calcul

Prenons un panneau en silicium polycristallin de 40 $\mathrm{W_c}$ (2,35 A/17 V) d'une surface de 360 $\mathrm{cm^2}$:

$$\eta = \frac{40}{0{,}36 \times 1\,000} = \frac{2{,}35 \times 1{,}7}{0{,}36 \times 1\,000} = 0{,}11$$

Ce panneau a un rendement (surface totale) de 11 % sous 1 000 $\mathrm{W/m^2}$.

Rappelons que ce rendement est indicatif et ne permet pas de rendre compte des performances du panneau par temps couvert (*cf.* section 2.2).

Couplage d'un photogénérateur avec un récepteur

Sur quel point de sa caractéristique le photogénérateur se placera-t-il ? Cela dépend du circuit extérieur.

Nous allons voir deux exemples types : le couplage avec un récepteur assimilable à un résistor, et le couplage avec une batterie.

Exemple 1 : le ventilateur

Prenons un photogénérateur de U_{co} = 17 V, I_{cc} = 0,7 A = 700 mA.

Couplons-le directement aux bornes d'un ventilateur, assimilable à un résistor de 28 Ω. La courbe caractéristique de ce dernier, $U = rI$, est une droite représentée en trait plein sur la **figure 3.7**.

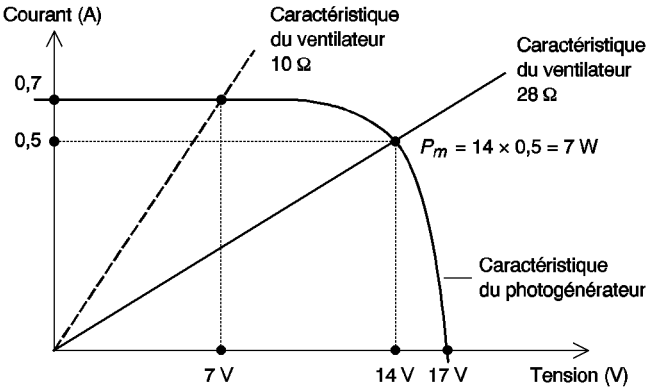


Figure 3.7.
Optimisation du couplage photogénérateur-ventilateur.

Ce couplage est idéal : les deux caractéristiques du générateur et du récepteur se croisent au point de puissance maximale du photogénérateur. Le ventilateur recevra dans ces conditions une puissance qui le fera fonctionner de :

$$14\ \text{V} \times 0{,}5\ \text{A} = 7\ \text{W}$$

Si l'on avait mis un ventilateur de 10 Ω (droite en pointillés sur la **figure 3.7**), il n'aurait reçu que :

$$7\ \text{V} \times 0{,}7\ \text{A} = 4{,}9\ \text{W}$$

Le photogénérateur aurait alors été sous-utilisé, car inadapté en tension.

Exemple 2 : charge d'une batterie

Si l'on charge une batterie au lieu d'alimenter directement un récepteur (**figure 3.8**), c'est la tension batterie qui impose le point de fonctionnement.

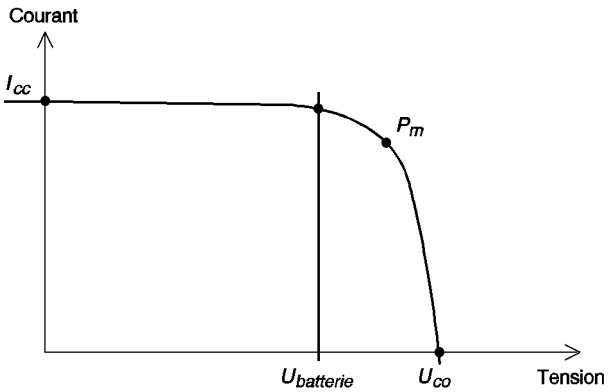


Figure 3.8.
Couplage d'un photogénérateur et d'une batterie.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Schéma équivalent d'un photogénérateur

On vient de constater que c'est l'association avec le récepteur qui « oblige » le photogénérateur à travailler à un certain courant et à une certaine tension. Contrairement à une idée couramment répandue, le photogénérateur est donc plutôt un *générateur de courant* qu'un générateur de tension, au moins dans la partie exploitable de sa caractéristique entre le I_{cc} et le P_m : en effet, c'est le courant qui est constant et non la tension. Au-delà du P_m, la courbe n'est pas exploitable car la puissance chute très vite, et si l'éclairement baisse par exemple, on risque de ne plus avoir de puissance du tout (voir Influence de l'éclairement et de la température, page suivante).

En termes électroniques, on peut représenter une photopile (générateur) alimentant directement un récepteur de la façon suivante (**figure 3.9**) :

G est une source de courant *parfaite*.

D est une diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un sens.

$\mathbf{R_{sh}}$ est une résistance *shunt* qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile (microcourt-circuits dans le silicium en particulier).

$\mathbf{R_s}$ est une résistance *série* qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).

$\mathbf{R_u}$ est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement sur la photopile en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré (dans le cas où le récepteur est assimilable à un résistor).

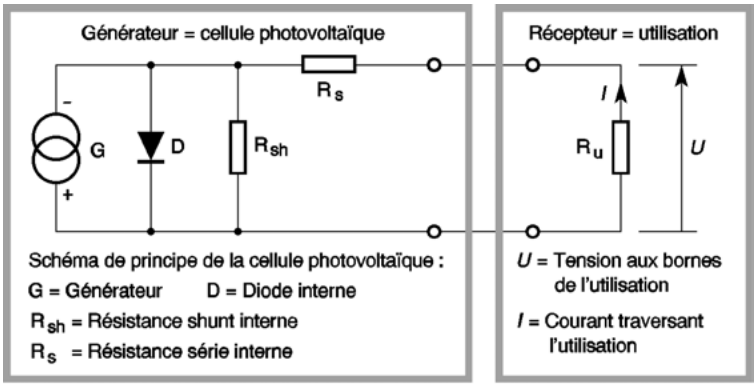


Figure 3.9. **Schéma équivalent d'un photogénérateur couplé à un récepteur.**

Influence de l'éclairement et de la température

Sous un ensoleillement fort (utilisation en extérieur)

Le courant I_{cc} varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. Cela est intéressant, notamment pour la charge d'une batterie.

Voyons par exemple les caractéristiques d'un panneau au silicium cristallin, telles que données par le fabricant (**figure 3.10**). On remarquera la puissance maximale, qui passe de 20 W_c à 1 kW/m² à 16 W_c à 0,8 kW/m².

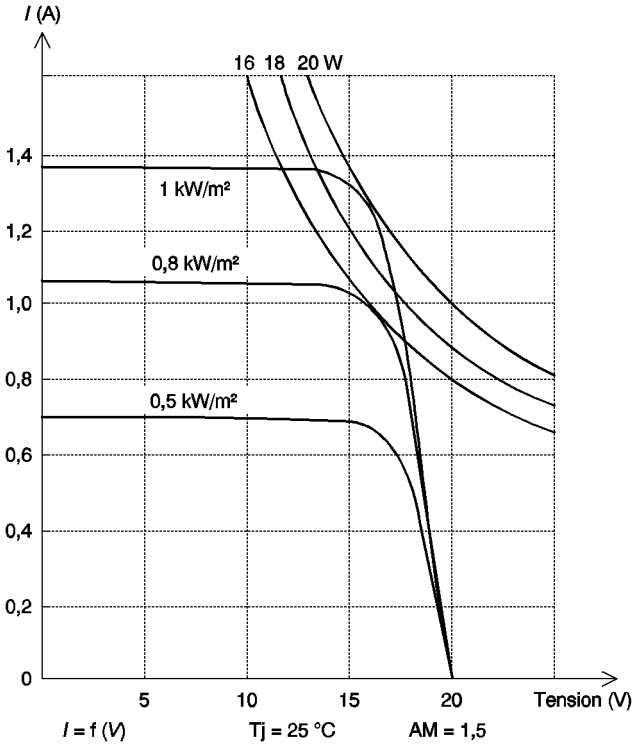


Figure 3.10. **Influence de l'éclairement sur les courbes courant-tension.**

La température a également une influence non négligeable sur les caractéristiques de ce panneau : quand la température s'élève, la tension diminue et donc la puissance aussi.

Les courbes de la **figure 3.11** montrent cette dérive des caractéristiques de ce panneau en silicium cristallin en fonction de la température. On constate que l'on passe d'une puissance optimale de 20 W à 25 °C à une puissance de 18 W pour une température de 45 °C : on est donc obligé de tenir compte de la

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

température d'utilisation de la photopile afin d'appliquer un coefficient réducteur de la puissance optimale à 25 °C.

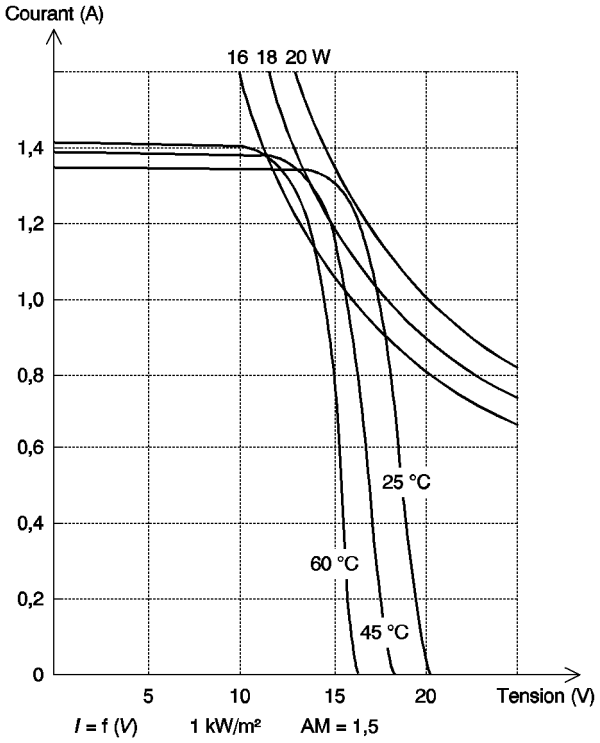


Figure 3.11. **Influence de la température sur les courbes courant-tension.**

Paradoxalement, cet inconvénient, sous les climats très chauds, devient un avantage dans les pays à climat tempéré et à forte luminosité.

Sous éclairage réduit (temps couvert ou en usage intérieur)

Quand l'éclairement est plus faible que 100 W/m², à environ 10 000 lux et a fortiori à l'intérieur des locaux, la tension de circuit ouvert de la photopile évolue à son tour. Elle baisse avec l'éclairement, il s'agit en fait d'une variation logarithmique de U_{co} en fonction de l'éclairement (**tableau 3.1**).

Les photopiles au silicium amorphe sont les seules à permettre un fonctionnement dans ces situations, grâce à une tension encore assez élevée.

Tableau 3.1. U_{co} typique d'un photogénérateur au silicium amorphe (par cellule).

Tension (V)	0,75	0,65	0,55
Éclairement (lux)	10 000	1 000	100

C'est grâce à cette caractéristique que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel (notamment en dessous de 1 000 lux), contrairement au silicium cristallin.

3.4 LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES

Nous résumons ici les propriétés des différents types de photogénérateurs. Le silicium cristallin et le silicium amorphe ont déjà été évoqués, ils représentent à eux seuls plus de 80 % du marché mondial des applications terrestres (par opposition aux « spatiales »). Mais d'autres matériaux semi-conducteurs sont également employés pour la fabrication des photogénérateurs : le $CuInSe_2$ (en abrégé CIS et son dérivé le CIGS), le CdTe (tellurure de cadmium) et le GaAs (arséniure de gallium).

REMARQUE

Les données ci-dessous sont des valeurs typiques, qui varient d'un constructeur à l'autre, et sont susceptibles d'évoluer : on vérifiera donc ces paramètres auprès des revendeurs ou des fabricants.

Arséniure de gallium (GaAs)

Ce matériau à très haut rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes à concentration. Dans ces applications, le rendement et le poids sont les critères de sélection et non le prix !

- Rendement électrique (STC, voir section 3.3, rubrique Puissance-crête/rendement) : 25-40 %.
- Usage : satellites, concentrateurs.
- Particularité : prix très élevé.

EN SAVOIR PLUS

Dans un système à concentration, des lentilles ou des miroirs paraboliques sont utilisés pour concentrer le rayonnement solaire

© DUNOD – pie non autorisée est un délit.

sur les panneaux. Ils sont donc équipés de *systèmes suiveurs* pour pointer toujours vers le soleil.

Silicium monocristallin

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : 15 à 20 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 W_c.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1 000 W/m^2.
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, habitat, centrales et toits solaires.

Silicium poly (ou multi-) cristallin

Cousin germain du précédent (composés de multicristaux, voir section 3.2), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairements modérés, et également moins onéreux.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 17 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 W_c.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1 000 W/m^2.
- Usage : id. silicium cristallin.

Silicium amorphe

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairements, extérieur *et* intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 12 % pour les « multi-jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 W_c.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90 W_c.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1 000 W/m^2 (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes…), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes, centrales au sol.

EN SAVOIR PLUS

Le silicium amorphe est « métastable ». Cela se traduit par des propriétés électriques meilleures en sortie d'usine qu'après quelques mois d'utilisation en extérieur. Ce phénomène dit de « stabilisation » (les propriétés sont stables ensuite) est moindre dans les photogénérateurs à multi-jonctions, mais conduit parfois à des malentendus sur les performances annoncées par les fabricants. Il faut donc bien se renseigner sur les valeurs stabilisées avant de choisir.

Les multi-jonctions sont constituées d'un empilement de 2, voire 3 jonctions p-i-n successives (voir la définition de la jonction à la section 3.1), avec des matériaux légèrement différents pour mieux absorber les différentes longueurs d'onde du spectre visible : des alliages silicium-germanium ou du silicium microcristallin. Par exemple, une cellule micromorphe est composée d'une jonction amorphe et d'une autre microcristalline.

Tellurure de cadmium (CdTe)

Intéressant surtout pour son coût de fabrication devenu très bas ces dernières années, ce matériau, qui a longtemps souffert de problèmes de stabilité et de maîtrise des procédés industriels, est aujourd'hui le leader incontesté des couches minces. En termes de performances, il se situe au niveau des meilleures multijonctions silicium amorphe. Cependant il risque de souffrir de problèmes de pénurie (le tellure est un élément rare) et il contient un élément potentiellement dangereux déjà interdit dans de nombreux pays (le cadmium[1]).

- Rendement énergétique des panneaux : 8 à 10 %
- Puissance des panneaux : 70 à 90 W
- Gamme d'éclairement : extérieur
- Usage : centrales solaires principalement.

1. Le cadmium est dangereux à manipuler lors de la fabrication et du recyclage des panneaux, mais une fois fixé dans un panneau solaire il ne présente pas de risque pour les installateurs ou les utilisateurs.

$CuInSe_2$ (CIS) et CuInGaSe (CIGS)

Les photopiles utilisant ces matériaux sont produites en couche mince par des méthodes chimiques ou de dépôt sous vide, sur une sous-couche de CdS (sulfure de cadmium). Elles ont d'assez bonnes propriétés électroniques. De plus, elles bénéficient des mêmes commodités de fabrication que le silicium amorphe (mise en série et découpe simples). Mais cette technologie est assez peu commercialisée dans le monde, sans doute à cause de difficultés d'industrialisation et de tenue climatique, mais surtout en raison du cadmium qu'elle contient (elle pourrait souffrir des directives européennes sur l'exclusion des matériaux dangereux, voir « Remarque importante » page 60).

- Rendement des panneaux : 10-12 %
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Usages : alimentations de faible et moyenne puissance en extérieur, habitat raccordé au réseau.

3.5 ÉNERGIE SOLAIRE ET ENVIRONNEMENT

Comme énergie renouvelable, l'énergie photovoltaïque est considérée comme une énergie propre et durable. Nous montrons ici les arguments en faveur de cette affirmation, car le recours à cette énergie est certainement un progrès, tant en termes d'impacts sur l'homme que sur la planète.

Impacts sur la planète

- L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable de toutes.
- Le silicium est un des matériaux les plus abondants de la croûte terrestre, et le plus employé à l'heure actuelle, donc l'énergie solaire photovoltaïque préserve les ressources naturelles.
- L'utilisation du photovoltaïque réduit la quantité d'énergie consommée pour produire de l'électricité, ce que l'on appelle l'*énergie grise*, en comparaison des autres méthodes de production. On estime aujourd'hui qu'un panneau solaire produit en quelques années seulement (4 à 6 selon les technologies) l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.
- La fabrication des panneaux solaires utilise en grande partie des matériaux recyclables ou revalorisés. Le silicium provient souvent des rebuts de l'électronique, le verre support et l'aluminium des encadrements et des fixations mécaniques sont des matériaux qui bénéficient déjà de filières de recyclage bien développées.

- La production d'électricité par un générateur photovoltaïque n'émet pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de pollution comparable à celle des modes de production traditionnels. En 2030, selon l'EPIA, l'association européenne du photovoltaïque[1], le solaire photovoltaïque permettra de réduire les émissions mondiales de CO_2 de 1,6 milliard de tonnes par an, soit l'équivalent de 450 centrales au charbon d'une puissance moyenne de 750 MW.
- C'est une énergie fiable et durable : les générateurs photovoltaïques sont modulaires, faciles à mettre en œuvre et à entretenir. Ils n'ont que très peu d'usure intrinsèque. Leur durée de vie est de 20 à 30 ans.

Impacts sur l'homme

- Cette industrie minimise les déchets toxiques. La pollution émise lors de la fabrication des cellules solaires est relativement faible (sauf en ce qui concerne certains matériaux à risque comme le cadmium, *cf.* section 3.4). Et il n'y a absolument aucune émission toxique lors de la génération d'électricité par les panneaux solaires.
- C'est une technologie qui favorise la santé publique. En particulier dans les pays à faible densité de population, souvent mal électrifiés, la production de froid du solaire photovoltaïque permet la conservation des aliments, des médicaments et des vaccins, et contribue ainsi à l'hygiène et à la santé dans les pays défavorisés. De même le pompage solaire et les systèmes de purification d'eau améliorent l'accès à l'eau potable.
- C'est une technologie qui favorise le développement humain. En apportant l'électricité dans des endroits reculés, le photovoltaïque améliore considérablement le niveau de vie des habitants : l'éducation est meilleure avec une école éclairée et équipée d'un ventilateur, et d'un téléviseur ; l'agriculture est facilitée par les possibilités d'irrigation, de travail mécanique (moulin à grains par exemple) ; le travail des artisans est encouragé par la présence d'électricité (pour les machines à coudre, les outillages, l'éclairage du soir, etc.).
- En conséquence, cette technologie évite l'exode rural et l'urbanisation massive difficiles à gérer dans certains pays, qui ne sont pas en mesure de fournir des emplois et des habitations décentes à tous ces migrants.

1. European Photovoltaic Industry Association : www.epia.org

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

- Dans la mesure où l'on constate généralement un lien direct entre l'augmentation du niveau de vie et la chute de la natalité, le photovoltaïque contribue indirectement à la régulation de la surpopulation mondiale.
- Dans les pays producteurs de panneaux solaires mais aussi un peu partout où ils sont vendus, installés, entretenus, le photovoltaïque génère de l'activité économique et des emplois.

4 STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

4.1 QUAND FAUT-IL UN STOCKAGE ?

Pour répondre à cette question, il faut bien distinguer les deux types d'installations : les générateurs raccordés au réseau, les plus fréquents aujourd'hui, et les générateurs autonomes. Ces deux types de systèmes sont décrits aux chapitres 5 et 6.

Les alimentations raccordées n'ont pas besoin de stockage car le réseau électrique en tient lieu : le consommateur puise sur le réseau l'énergie dont il a besoin (*cf.* section 6.1).

Mais lorsqu'il s'agit d'une alimentation autonome, plusieurs cas se présentent :

- S'il y a concordance entre la présence de la lumière et le besoin d'énergie, il n'est pas nécessaire de la stocker (exemples : une calculette, un ventilateur…).
- Si l'on stocke l'énergie sous une autre forme, on peut également se passer de stockage électrique (exemple : une pompe alimentée par énergie solaire stocke l'eau dans un réservoir : la pompe fonctionnera à débit variable, en fonction de l'ensoleillement et sur une journée, ou une autre base de temps, elle aura stocké suffisamment d'eau pour les usagers).

Dans ces deux cas, on parle de fonctionnement « au fil du soleil » : il y a de la lumière, cela fonctionne ; il n'y en a plus, cela s'arrête.

Mais le plus souvent, on souhaite disposer d'énergie électrique dans l'obscurité pour de multiples raisons :

- une montre ne doit pas s'arrêter la nuit (ni quand on la laisse un certain temps dans un tiroir) ;
- on s'éclaire plutôt quand il fait nuit ;
- une surveillance de barrage doit être active 24 h/24 ;
- etc.

Plusieurs cas se présentent alors : soit on dispose d'une autre source d'énergie à laquelle on peut avoir recours quand les panneaux sont dans l'obscurité (éolienne, groupe électrogène…), soit il faut stocker de l'électricité dans une batterie. La capacité stockée, et donc la réserve de marche sans lumière, dépendent énormément de l'application, comme expliqué ci-dessous.

Autonomie « sans apport solaire »

C'est la *durée* pendant laquelle le stockage assure le fonctionnement du récepteur *sans recevoir aucune charge* de la part du photogénérateur. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photogénérateur.

Exemple

Avec une batterie 12 V-10 Ah, et un récepteur 5 W sous 12 V fonctionnant 3 h par jour, la consommation du récepteur est la suivante :

$$\frac{5\,\mathrm{W} \times 3\,\mathrm{h}}{12\,\mathrm{V}} = 1{,}25\,\mathrm{Ah/jour}$$

L'autonomie sur la batterie 10 Ah sera donc de :

$$\frac{10\,\mathrm{Ah}}{1{,}25\,\mathrm{Ah/jour}} = 8\,\mathrm{jours}$$

En pratique, on aura environ 6 jours d'autonomie, compte tenu des pertes électriques. Le besoin en autonomie, comme on l'a vu, dépend du type de récepteur et de son usage.

- Pour une montre solaire, on peut décider de garantir un fonctionnement d'un mois dans l'obscurité (au-delà, il faudra la remettre à l'heure). L'autonomie sans apport solaire sera donc de 30 jours.
- Pour une alimentation de haute sécurité en extérieur, on choisira de maintenir 15 jours de fonctionnement dans la batterie pour pallier une succession de journées mal ensoleillées (ce n'est qu'un exemple, cela dépend bien sûr du climat). L'autonomie sans apport solaire sera donc de 15 jours.
- Pour un usage domestique de week-end (chalet isolé par exemple), on se contentera de stocker pour la durée maximale de séjour des occupants. L'autonomie sans apport solaire sera alors de 3 jours, par exemple.

- Pour une calculatrice, même si elle fonctionne au fil du soleil, il faut fournir un pic de courant au démarrage des circuits, on pourra alors mettre un condensateur qui se chargera hors des périodes d'utilisation et fournira ce courant plus élevé sur une très courte durée. Dans ce cas, l'autonomie sans apport solaire sera de quelques microsecondes !

En général, pour un usage extérieur, sous nos climats, il faut *5 à 15 jours d'autonomie* dans la batterie pour être sûr de fonctionner toute la journée, tous les jours de l'année. En effet, la batterie doit faire fonctionner le système en cas de successions de journées mal ensoleillées.

Nous y reviendrons plus en détail dans la description des applications (chapitres 5 à 7).

Principe du couplage photogénérateur-batterie

Certains pensent qu'il faut utiliser l'énergie issue directement du photogénérateur quand la lumière est présente, et « basculer » sur le stockage dans l'obscurité : c'est inutile. Le plus rationnel est de monter le photogénérateur, la batterie, et le récepteur en parallèle (avec des composants de régulation décrits à la section 4.4).

Ainsi, la batterie sera le « réservoir d'énergie », que l'on remplira d'un côté par le photogénérateur et videra d'un autre par le récepteur. Ces deux événements peuvent être simultanés ou non, peu importe, pourvu que la batterie ne soit jamais déchargée (cela est obtenu lorsque le dimensionnement est correct, voir section 5.2).

Encore une fois, on peut faire appel à l'analogie hydraulique pour mieux se représenter ce qui se passe : prenons une citerne qui se remplit grâce à l'eau de pluie. Qu'il pleuve ou non, on se servira dans la citerne pour consommer l'eau récoltée, ce qui est plus simple que de prendre tantôt l'eau de pluie quand il pleut, tantôt celle de la réserve. De plus, le débit de consommation peut ainsi être supérieur, à un instant donné, au débit de remplissage. Il en est de même pour la batterie de stockage, équivalente à la citerne de notre comparaison.

Autre avantage de ce montage photogénérateur/batterie/récepteur en parallèle : la batterie jouera le rôle de régulateur de tension pour alimenter le récepteur. Car rappelons-le, le photogénérateur, lui, est un générateur de courant qui peut travailler sur une large plage de tension (de 0 V à sa tension de circuit ouvert). La batterie impose la tension du montage parallèle et stabilisera ainsi la tension fournie au récepteur, ce qui est un avantage évident pour certains d'entre eux. Un tube fluorescent en 12 V continu, par exemple, se détériore assez vite s'il reçoit une tension trop faible (< 10 V).

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système

Les règles de montage série et parallèle (voir section 1.3) s'appliquent également aux accumulateurs. Deux batteries de 100 Ah de 12 V en série donneront 100 Ah-24 V, et les mêmes en parallèle donneront 200 Ah-12 V. Mais pour les montages en parallèle, il est impératif que les deux batteries soient des « sœurs jumelles » (même capacité, même numéro de série, même antécédents), sinon on risque de voir la plus faible dépérir au profit de l'autre : sa résistance interne augmentera et la batterie « en meilleure santé » prendra la plus grande part du courant de charge, ce qui ne fera qu'accentuer le déséquilibre.

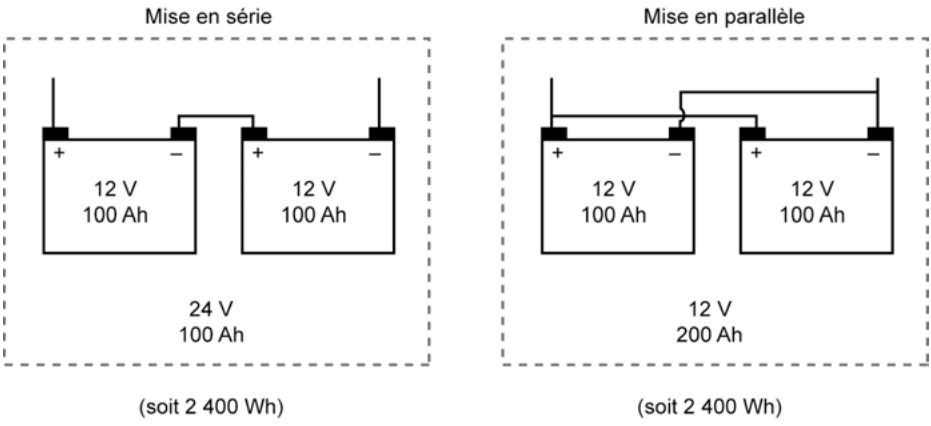


Figure 4.1. **Montage des batteries en série ou en parallèle.**

On préférera donc les montages série (addition de tensions), aux montages en parallèle (addition de capacités).

4.2 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES ACCUMULATEURS

Il ne s'agit pas ici de faire un cours complet sur les comportements détaillés de charge et décharge de tous les accumulateurs existants. Ces informations complètes sont disponibles dans des ouvrages techniques édités par les constructeurs.

Nous donnerons les principales définitions et règles à connaître pour l'emploi d'un accumulateur en association avec un photogénérateur.

Tension nominale

C'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé, elle s'exprime en volts.

Exemples

CdNi à quatre éléments :

$$4 \times 1{,}2\ \text{V} = 4{,}8\ \text{nominal}$$

Plomb à six éléments :

$$6 \times 2\ \text{V} = 12\ \text{V nominal}$$

Tension de charge

C'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur, elle s'exprime en volts.

Exemples

Tension de charge du CdNi :

1,4 V par élément, soit pour quatre éléments :

$$4 \times 1{,}4\ \text{V} = 5{,}6\ \text{V en charge}$$

Tension de charge du plomb :

2,2 à 2,4 V par élément (selon les modèles), soit pour six éléments :

$$13{,}2 \text{ à } 14{,}4\ \text{V en charge}$$

Capacité de la batterie

C'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en *ampères-heures* (Ah), car on comptabilise cette énergie par le produit du courant que l'on tirerait (en A) par la durée de cette décharge (en heures).

ANALOGIE

La capacité de la batterie correspondrait au volume total d'un réservoir d'eau, soit le volume d'eau que l'on peut récupérer quand il est plein, ou produit du débit par le temps d'écoulement.

Contrairement à ce qui se passe dans l'analogie du réservoir d'eau, l'énergie stockable ou « capacité » d'une batterie dépend de beaucoup de paramètres, en particulier de la façon dont elle a été chargée et déchargée. On doit donc donner la capacité dans

© DUNOD – La photocopie non a ...slit.

des conditions de référence, souvent pour une durée de décharge de 20 heures et pour une température de 25 °C. On parlera alors de *capacité nominale*.

La température ambiante joue aussi énormément sur la capacité de la batterie, c'est sans doute le paramètre le plus important. Les réactions chimiques sont ralenties par le froid, c'est bien connu. *Une batterie a donc une capacité beaucoup plus faible à froid qu'à chaud*. Cette différence peut aller du simple au double. C'est donc la gamme de température que la batterie rencontrera qui doit en premier guider le calcul d'une capacité.

Charge

La charge est l'opération qui consiste à *entrer* de l'énergie dans la batterie. C'est ce que fait le photogénérateur qui lui est couplé en débitant un *courant de charge* (en ampères) dans la batterie.

La charge correspondrait au remplissage d'un réservoir. Le courant de charge est analogue au débit de la source d'eau qui remplit le réservoir.

L'usage a longtemps voulu que l'on recharge les accumulateurs selon la règle du dixième, c'est-à-dire en leur appliquant un courant égal au dixième de la capacité horaire (exprimée en ampères-heure) de l'accumulateur. Une telle charge est dite $C/10$ ou $0{,}1C$ (C étant la capacité nominale de l'accumulateur exprimée en ampères-heure).

Même si ce régime à $0{,}1C$ est idéal pour la longévité des accumulateurs et pour le rendement de charge, les accumulateurs modernes sont capables de supporter des recharges sous des courants considérablement plus intenses, ou considérablement plus faibles (jusqu'à $C/500$ pour les accumulateurs au plomb).

En général, une opération de charge est d'autant plus efficace et inoffensive pour la durée de vie de l'accumulateur qu'elle dure plus longtemps sous un courant faible.

La charge par un photogénérateur se pose rarement en ces termes (sauf charge sous une lampe de constante intensité) car dehors en particulier, le courant débité par le photogénérateur, et donc le

courant de charge de l'accumulateur, est très variable, entre le début et la fin de la journée, d'une journée à l'autre ou d'une saison à l'autre. Le phénomène de charge d'un accumulateur par un photogénérateur s'apparente donc plus souvent à une *charge à tension constante* (celle qu'impose l'accumulateur) qu'à une *charge à courant constant*. Les manuels des constructeurs font bien la distinction entre ces deux modes dans la description des comportements de batteries, on s'y référera pour plus d'information.

Décharge

Opération qui consiste *à sortir* de l'énergie de la batterie. C'est ce que fait le récepteur qui lui est couplé en absorbant un *courant de décharge* (en ampères) issu de la batterie.

ANALOGIE

La décharge correspondrait au vidage d'un réservoir. Le courant de décharge est alors le débit que l'on tire de celui-ci pour consommer de l'eau.

La durée de vie des accumulateurs dépend principalement de la profondeur de la décharge imposée (rapport entre la quantité d'électricité déchargée et la capacité nominale) ; il faudra tenir compte de ce paramètre, décharge maximale, pour le calcul de la capacité de l'accumulateur. En effet, il existe un seuil de tension sous lequel on ne peut plus décharger l'accumulateur, sous peine de le détériorer.

D'autre part, plus le courant de décharge est faible, par rapport à sa capacité nominale, plus la capacité de l'accumulateur sera grande. Le courant de décharge peut être constant ou non dans les applications pratiques de l'énergie photovoltaïque. S'il s'agit d'éclairer en permanence, le courant de décharge sera globalement constant. Mais s'il s'agit par exemple d'un portail automatique, avec un récepteur qui fonctionne 23 h/24 en veille (10 mA par exemple) et un moteur qui fonctionne 1 h par jour en moyenne (2 A typiquement), les courants de décharge sont extrêmement variables. On s'assurera, dans ce cas, que l'accumulateur peut supporter le courant de décharge important (2 A) pendant le temps de la manœuvre du portail soit 10 à 15 s.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Exemple de caractéristiques pour un accumulateur au plomb

Un exemple de caractéristiques pour un accumulateur au plomb est présenté sur le **tableau 4.1** et la **figure 4.2** pour une tension nominale de 6 V et une capacité de 1,2 Ah/20 h.

Tableau 4.1. Exemple de capacité de décharge d'un accumulateur plomb à courant constant.

	Durée (en heures)	Intensité (en ampères)	Capacité (en ampères-heures)
Capacité à 20 °C	20	0,06	1,2
	5	0,2	1,0
	1	0,7	0,7

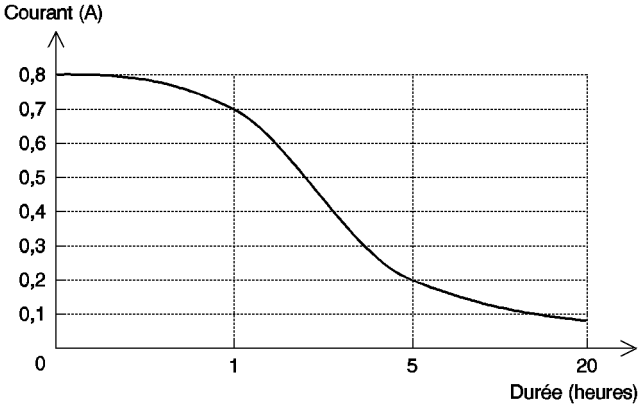


Figure 4.2. **Profil de décharge à tension constante d'une batterie Plomb.**

Cet exemple confirme que la capacité d'un accumulateur est fonction de son mode de décharge. Elle est d'autant plus élevée que le courant de décharge est faible. Il est donc difficile de prévoir le comportement en décharge de l'accumulateur « solaire » d'une manière générale, puisque les courants de décharge varient.

Mais il faut retenir que dans la plupart des applications, les courants de décharge sont globalement faibles et la capacité réellement disponible dans l'accumulateur ne peut être que supérieure à la capacité nominale (sauf à basse température).

En effet, l'autonomie (et donc le temps de décharge totale) se compte plus en jours qu'en heures (comme nous l'avons vu à la section 4.1).

4.3 TECHNOLOGIES D'ACCUMULATEURS ET LEUR ADÉQUATION AU SOLAIRE

Les accumulateurs au plomb « ouvert »

Ils sont ainsi nommés car l'électrolyte est liquide et doit être renouvelé (comme dans une batterie de voiture).

C'est le type le plus ancien et le plus utilisé. Un élément plomb-acide se compose d'une électrode de plomb et d'une électrode d'oxyde de plomb baignant dans l'acide sulfurique dilué.

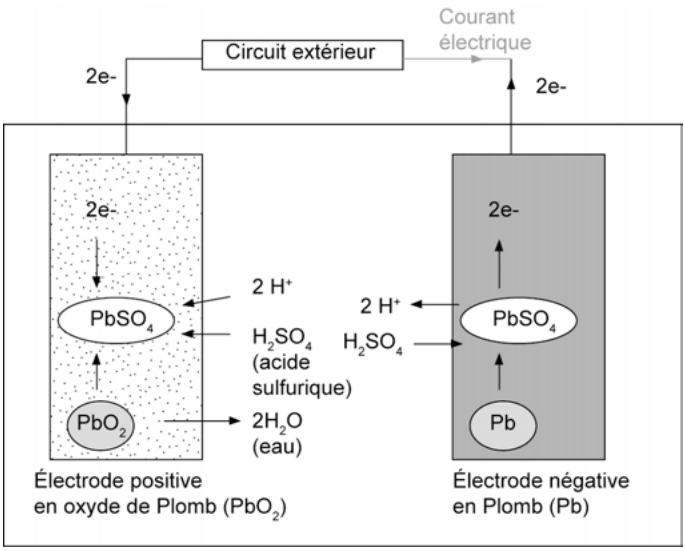


Figure 4.3. **Principe de l'accumulateur au plomb (e^- est un électron ; le sens du courant est par convention en sens inverse de la circulation d'électrons).**

Tension nominale par élément : 2 V (tension nominale de batteries par association d'éléments en série : 4, 6, 12, 24 et 48 V pour les plus courants).

Attention : les batteries plomb dites « de démarrage » employées dans les véhicules ne sont pas bien adaptées au solaire. En effet, on peut les comparer à des « sprin-ters » devant fournir des courants de démarrage importants en des temps très courts (charge et décharge rapides). La batterie « solaire » quant à elle, plutôt « coureur de fond », sera sollicitée dans la durée à des courants beaucoup plus faibles et la technologie n'est pas tout à fait la même (surface d'échange électrolyte/ électrodes supérieures, en particulier). On s'adressera aux constructeurs pour choisir les batteries appropriées à chaque usage.

Mais il existe de bonnes batteries « ouvertes », dites « solaires », bien adaptées aux applications photovoltaïques, de capacité 100 à 500 Ah. Elles sont composées de plaques assez épaisses, d'une bonne réserve d'électrolyte et de bouchons à recyclage qui évitent

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

les pertes par temps chaud. Robustes et économiques, moyennant une surveillance des niveaux 1 à 2 fois par an, elles peuvent durer plus de 10 ans. C'est une excellente solution pour une installation domestique en Afrique ou un chalet isolé en Europe par exemple.

Les accumulateurs plomb étanche

De technologie électrolyte gélifié ou à recombinaison de gaz, ils ont les mêmes caractéristiques que les plomb « ouverts » mais sont étanches. Ils peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne nécessitent absolument aucun entretien (pas d'eau à rajouter). Ce qui est un avantage certain pour des alimentations photovoltaïques avec un minimum de maintenance.

On les trouve en outre dans des capacités inférieures aux batteries plomb « ouvertes ».

Les avantages essentiels de la technologie plomb (ouverte et étanche) pour le photovoltaïque sont les suivants :

- longévité ;
- bon rapport qualité/prix ;
- entretien faible ou nul ;
- bonne tenue aux températures extrêmes ;
- charge possible à courant faible.

Néanmoins, pour assurer leur durée de vie, quelques précautions sont nécessaires :

- éviter les décharges profondes et les surcharges (c'est le rôle d'un régulateur de charge, voir section 4.4) ;
- maintenir les batteries chargées quand on les stocke (par une recharge tous les 3 ou 6 mois).

Les accumulateurs Nickel Cadmium (NiCd)

Le NiCd a longtemps été le couple électrochimique le plus utilisé en faible capacité, dans toutes les applications rechargeables. Il est constitué d'une électrode de cadmium et d'une électrode d'oxhydroxyde de nickel NiOOH, et il a une tension nominale de 1,2 V.

En perte de vitesse depuis l'apparition des NiMH (voir ci-dessous), les accumulateurs nickel-cadmium restent néanmoins plus intéressants pour le solaire, du fait de leur meilleure efficacité de charge à faible courant et de leur bonne tenue aux basses températures. Malheureusement, il est recommandé de les charger au-dessus de 0 °C, ce qui complique leur utilisation en extérieur dans les pays

froids (ils se chargent mal l'hiver). Ils ont donc leur place dans des alimentations par photopiles, en intérieur, pour des capacités de stockage inférieures à 2 Ah.

Attention : la formulation NiCad est incorrecte.

Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH)

Dérivés des NiCd, ces accumulateurs ont été développés avec 3 objectifs : augmenter la capacité par unité de volume, favoriser les charges rapides (pour le marché du téléphone portable notamment) et éliminer le cadmium, toxique pour l'environnement et déjà interdit dans certains pays. L'électrode de cadmium est remplacée par un alliage apte à stocker l'hydrogène d'où son nom NiMH. À part la première caractéristique (ils sont plus compacts), ces accumulateurs ne sont pas meilleurs que les NiCd pour le solaire. Ils sont même moins bons en ce qui concerne la tenue au froid. Mais ils les ont déjà pratiquement remplacés chez tous les fabricants.

Les avantages des NiCd et NiMH pour le solaire sont les suivants :

- petites capacités disponibles sous de multiples formes (boutons, bâtons, prismes…) de 30 à 2 000 mAh ;
- plus compacts que les batteries plomb (30 % de capacité en plus) ;
- plus de tensions disponibles, du fait de la valeur 1,2 V par élément : 2,4 V ; 3,6 V ; 4,8 V ; 12 V… ;
- excellente tenue à la chaleur.

Les inconvénients des NiCd et NiMH pour le solaire sont les suivants :

- autodécharge ;
- charge difficile à moins de 0 °C ;
- effet mémoire ou cristallisation quand les accumulateurs sont peu sollicités (voir « en savoir plus » ci-dessous).

EN SAVOIR PLUS

L'effet « mémoire » : schématiquement, il s'agit d'un phénomène d'accoutumance. Si un accumulateur NiCd est régulièrement déchargé à 20 % de sa capacité par exemple, il aura du mal, après un certain temps à ce régime, à fournir à la demande une capacité supérieure, 80 % par exemple.

Remarque : tous ces paramètres sont très dépendants des modèles choisis (voir les fiches techniques des fabricants).

EN SAVOIR PLUS

Il existe également de grosses batteries NiCd à très hautes performances, environ trois fois plus onéreuses que les batteries plomb étanches, mais qui sont les seules à atteindre des durées de vie de l'ordre de 20 ans. On les utilise dans des applications solaires, mais dans des cas particuliers et quand le déplacement sur site revient très cher (sites inaccessibles ou dangereux).

Remarque importante : la directive européenne 2002/95/CE, en abrégé RoHS (qui vise à éliminer dans toute l'Union certaines substances dangereuses, comme le cadmium, des produits électroniques et électriques à compter du 1er juillet 2006), soulève la question de l'interdiction des batteries au cadmium. Pour le moment, ces batteries sont exclues de cette directive et doivent obéir à une directive antérieure qui régit le commerce et le recyclage des piles et accumulateurs (91/157/EEC du 18 mars 1991). Cependant, il est probable que cette situation ne durera pas et que le NiMH détrônera définitivement le NiCd à plus ou moins long terme.

Les accumulateurs au lithium

Le lithium rechargeable est présent sur nombre d'appareils portables sous le nom « Li-ion », de tension 3,6 V. Très compacte et à recharge rapide, cette technologie n'est pas très bien adaptée au solaire à ce jour, en particulier parce que les accumulateurs doivent subir un protocole de charge assez précis, plutôt incompatible avec les courants éminemment variables d'un photogénérateur soumis à divers éclairements.

De plus, il est arrivé des dommages importants voire des incendies à cause de batteries au lithium surchargées qui se sont très fortement échauffées. Or, un panneau solaire comme on l'a vu à la section 3.3, a une tension qui peut s'élever largement au-dessus de la tension de la batterie. Un excellent limiteur de surcharge est donc indispensable pour protéger une batterie au lithium avant de la coupler à un photogénérateur.

Les supercondensateurs

Un supercondensateur (ou supercapacité) est un condensateur permettant d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie beaucoup plus élevées que les condensateurs électrolytiques classiques. La technique utilisée repose sur la technique *Electric Double Layer* qui, grâce à l'utilisation d'électrodes en carbone en lieu et place des classiques électrodes métalliques, permettent d'atteindre des épaisseurs de diélectrique inférieures au nanomètre (< 0,001 mm). Si l'on se souvient que la capacité d'un condensateur est inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique, on comprend immédiatement l'intérêt de l'utilisation du carbone dans une telle application. Pour un même volume, la capacité est 100 fois plus élevée que celle de condensateurs à diélectrique traditionnels.

Certes leur densité d'énergie est en général 20 à 50 fois plus faible que celle d'un accumulateur classique (de 1 à 40 kJ/kg) mais, pour les meilleurs d'entre eux, elle est comparable de fait à la densité pratique d'un accumulateur au plomb étanche (10 à 15 Wh/kg maximum) dans le cas de décharges de courte durée (10 à 15 min).

Leur fonctionnement électrique est le même que celui d'un condensateur :

- ils ne sont pas polarisés ;
- on peut les charger de 0 à 2,7 V ou 5,5 V selon les modèles ;
- la résistance interne est très faible, ce qui autorise de forts courants de charge et de décharge ;
- en conséquence, les temps de charge et de décharge peuvent être très courts, de l'ordre de quelques secondes ;
- par contre ils présentent un peu d'autodécharge (en µA).

Comme les condensateurs, de leur capacité, qui se chiffre en farads, dépend la quantité d'énergie qu'ils peuvent stocker, selon la hausse de tension à leurs bornes.

EN SAVOIR PLUS

Calcul d'un condensateur de stockage

La formule $Q = CU$ illustre la propriété d'un condensateur à stocker des électrons, avec C en farads (capacité du condensateur), Q en

coulombs (quantité de charges stockées), et U en volts (tension aux bornes du condensateur).

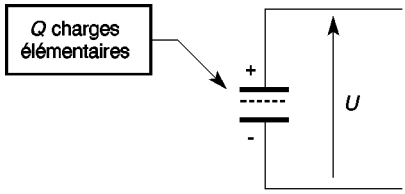


Figure 4.4.
Charge d'un condensateur.

Nous savons également que le courant électrique I correspond à une circulation d'électrons, soit une quantité Q de charges élémentaires circulant dans le circuit par seconde.

La formule $Q = IT$ traduit cette circulation d'électrons, avec I en ampères, Q en coulombs, T en secondes.

La circulation d'un courant constant I pendant une durée T fait chuter la tension aux bornes de C de la valeur U_2 à la valeur U_1. Dans le cas où ce condensateur alimente un montage, cette durée T correspond au temps de fonctionnement avant une nouvelle recharge.

On note V cette chute de tension : $V = (U_2 - U_1)$.

En égalant les deux expressions caractérisant la quantité de charge soustraite au condensateur pendant une durée T par un courant constant I, on obtient :

$$IT = C \times (U_2 - U_1) = CV$$

d'où :

$$C = \frac{IT}{V}$$

Ce type de calcul est mis en pratique pour l'application luxmètre (*cf.* section 7.3) qui met en œuvre un tel stockage.

Pour l'énergie solaire les supercondensateurs sont intéressants pour les stockages de courte durée, et les décharges rapides, à condition que l'application puisse travailler sur une plage de tension et que l'autodécharge soit compensée (c'est plus critique en utilisation intérieure quand la photopile produit des micro-ampères et non des milliampères).

4.4 LE CONTRÔLE DE CHARGE

Les diodes anti-retour

Parlons d'abord de ces diodes anti-retour, qui ne relèvent pas à proprement parler du contrôle de charge, mais sont généralement intégrées dans les contrôleurs.

Le courant circule naturellement du point de tension le plus fort vers le plus faible.

Lorsque le photogénérateur se trouve dans l'obscurité (la nuit notamment), la tension de la batterie dépasse la tension délivrée par le photogénérateur. Le courant passerait alors de la batterie vers le photogénérateur, si on ne mettait pas une diode qui bloque le passage du courant dans ce sens. Cela pourrait l'endommager.

Cette diode a le rôle d'une valve qui évite la décharge de la batterie dans le photogénérateur lorsque la lumière est faible (la tension du photogénérateur est basse) (**figure 4.5**).

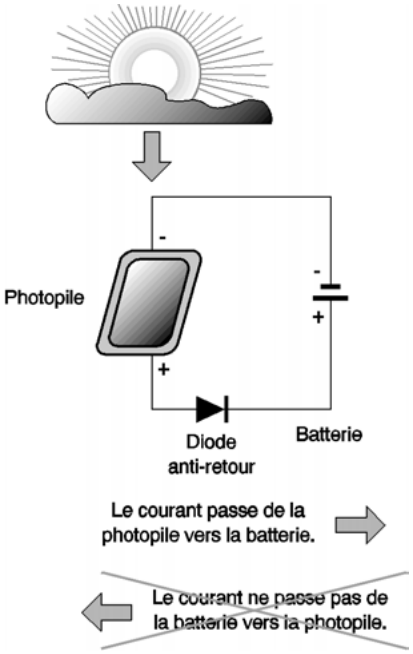


Figure 4.5.
Principe d'une diode anti-retour.

Important

Les diodes anti-retour sont aussi utilisées lors de la mise en parallèle de plusieurs photogénérateurs et pour éviter qu'ils débitent les uns dans les autres s'ils ont une puissance inégale, ou s'ils ne reçoivent pas la même lumière.

Remarque : la chute de tension générée par une diode est à prendre en compte lors du calcul d'une application (voir section 5.3).

Cette chute de tension est de 0,6 V (diode de redressement classique) ou de 0,2 V (diode Schottky), voir son emplacement sur les schémas de régulation (**figures 4.6** et **4.7**).

Pourquoi un contrôle de charge ?

Cela part d'une constatation toute simple : les batteries ont, la plupart du temps, en extérieur tout au moins, une durée de vie inférieure aux photogénérateurs. Il faut donc tout faire pour les « ménager » afin qu'elles durent le plus longtemps possible, et surtout faire en sorte qu'aucun événement ne leur soit fatal.

- Durée de vie des panneaux solaires : 10-20 ans ;
- durée de vie des batteries : 2 à 10 ans (voire 15 ou 20 ans pour les plus haut de gamme).

Fonctions d'un régulateur de charge

Protéger la batterie pour lui assurer une meilleure durée de vie, pour que l'application autonome le soit pendant longtemps, c'est donc l'objectif d'un régulateur de charge.

Améliorer la durée de vie d'une batterie Plomb (les plus utilisées), c'est empêcher :

- la surcharge : que la tension dépasse un certain seuil ;
- la décharge profonde : que la batterie soit vidée de plus de 90 % de sa charge.

On réalise ces deux fonctions avec un régulateur charge/ décharge connecté avec les panneaux, la batterie et l'utilisation.

Quand la tension aux bornes de la batterie atteint 14,5 V (seuil haut typique pour une batterie au plomb de 12 V nominale), le régulateur coupe la liaison avec le panneau et rétablit la charge quand la batterie est redescendue à 13,5 V ; ou bien il maintient un courant d'entretien à une tension adéquate (tension de *floating* de la batterie).

De même, quand la tension atteint 11,5 V (seuil bas typique pour 12 V), le régulateur coupe la liaison avec le récepteur, ce qui ne permet plus son utilisation, puisqu'il met ainsi l'appareil hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de 12,5 V. Il rétablit alors l'utilisation.

Notons que la *protection surcharge* est presque toujours indispensable, car une alimentation solaire est excédentaire en énergie une partie du temps (l'été surtout). Il n'en est pas de même de la *protection décharge*, qui est davantage une sécurité en cas d'incident : en effet, si le dimensionnement est bon et les composants bien adaptés, la batterie ne doit pas entrer en décharge profonde. Si cela se produit, ce ne peut être qu'accidentel. On mettra une protection décharge lorsqu'il y a un risque de surconsommation (appareil laissé allumé par erreur, par exemple), ou une batterie très onéreuse. Dans ce cas, on préférera interrompre l'utilisation plutôt que d'endommager la batterie par décharge profonde en cas d'incident.

En pratique, ces fonctions anti-retour et régulation de charge sont réalisées par des boîtiers électroniques avec une logique à relais ou à transistors. Ils peuvent être de type shunt (pour les basses puissances) ou de type série (pour les puissances élevées). Entre autres caractéristiques, ils sont déterminés par le courant d'entrée (courant maximal des panneaux) et le courant de sortie (courant maximal de l'utilisation) qu'ils supportent. S'ils ne comportent pas de protection décharge, ils sont appelés *limiteurs de charge* ou *régulateurs de surcharge*, se placent entre le panneau et la batterie, et donc seul le courant du panneau solaire conditionnera leur ampérage.

Des modèles plus sophistiqués que le « tout-ou-rien » comportent une adaptation d'impédance pour suivre le point de puissance maximale du panneau (MPPT pour *Maximum Power Point Tracking*) en toutes circonstances ou réalisent une fin de charge programmée avec une modulation des largeurs d'impulsions (PWM pour *Pulse Width Modulation*) pour réduire les dissipations thermiques.

La **figure 4.6** montre le principe d'un régulateur charge/décharge de type série, modèle « tout-ou-rien ».

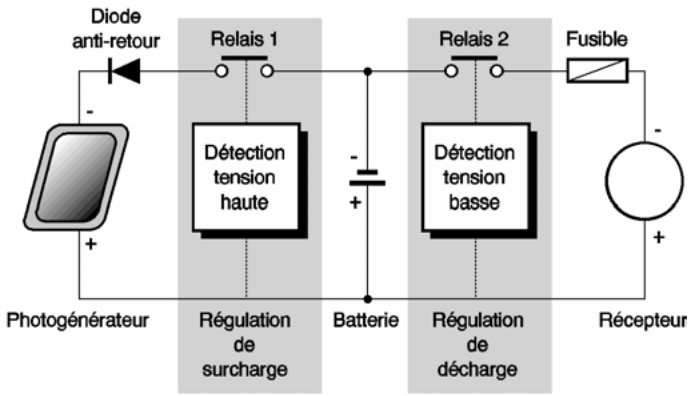


Figure 4.6.
Principe de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Ce système mesure en permanence la tension batterie et agit en conséquence, selon son état de charge.

Le diagramme de la **figure 4.7** présente les 3 situations rencontrées.

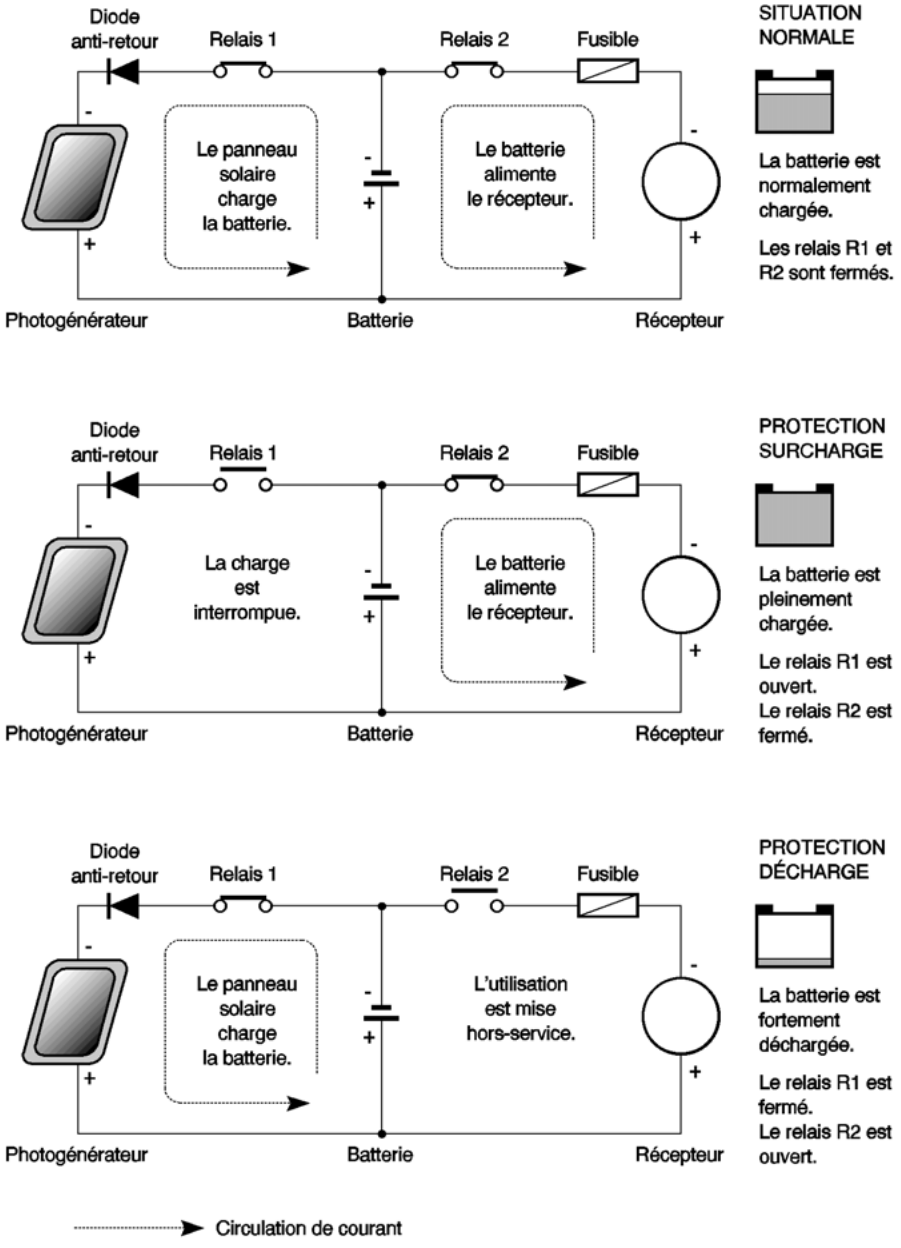


Figure 4.7.
Diagramme des 3 états de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge.

Ces régulateurs étant faits pour les alimentations en extérieur, avec des panneaux solaires de 5 W_c et plus, disons un mot des régulations pour les systèmes électroniques de faible puissance (applications utilisées en intérieur). Ces alimentations solaires recourent plutôt à des batteries NiCd, NiMH ou à des capacités.

Souvent, une simple diode Zener de limitation surcharge placée en parallèle sur l'accumulateur suffit (sans oublier la diode anti-retour). Cette diode Zener deviendra passante au-delà d'une certaine tension, réalisant ainsi une régulation surcharge de type shunt (se renseigner auprès du fabricant pour connaître la tension maximale supportée par l'accumulateur). Sinon, il existe des circuits intégrés pouvant gérer la charge et la décharge de composants faible puissance (voir nos applications à base de photopiles du chapitre 7).

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

5 GÉNÉRATEURS AUTONOMES AVEC STOCKAGE

Il est temps de s'interroger sur le « bon usage » de l'énergie solaire, en précisant ce qui est possible et ce qui ne l'est pas (ou pas encore !).

Un des atouts de l'énergie photovoltaïque réside dans la possibilité de fournir une autonomie de fonctionnement à un appareil nécessitant une source d'électricité indépendante.

Nous allons aborder dans ce chapitre les installations ou produits photovoltaïques autonomes (non raccordés au secteur).

5.1 LES SECTEURS D'APPLICATION

Produits grand public

Sous éclairage artificiel, une cellule solaire peut alimenter : calculettes, montres, jouets, lampes de poche, balances, pèse-personnes, animations publicitaires en vitrines, etc.

Potentiellement, tout objet de consommation très réduite qui se trouve fréquemment exposé à la lumière peut être alimenté par une photopile, ce qui permet :

- de disposer d'un appareil sans « fil à la patte » ;
- d'éviter toute contrainte de changement de piles, et de réaliser des économies de fonctionnement ;
- d'économiser la mise en place d'un logement pile dans l'appareil.

Ce dernier facteur est surtout à l'origine du plus grand succès de l'énergie lumière à ce jour en terme de mètres carrés de photopiles vendus dans le monde : la calculatrice solaire.

À l'extérieur, on dispose de plus de lumière, on pourra rendre totalement autonome tout équipement électrique à consommation modérée ou intermittente, placé dehors ou pouvant être alimenté par des panneaux exposés à l'extérieur : éclairage portable, radio et éventuellement mini-ordinateur.

Habitat isolé

L'électricité solaire autonome pour l'habitat est particulièrement rentable dans les cas suivants :

- habitat éloigné du réseau d'électricité, ou difficile d'accès (milieu rural, montagne, îles…) ;
- besoins modestes en énergie avec des consommations optimisées (voir section 5.2) : éclairage, réfrigération, pompage de l'eau, petit électroménager, et en aucun cas le chauffage, qui doit être alimenté par des capteurs thermiques ;
- occupation intermittente (maison de week-end) ;
- énergie complémentaire en couplage avec un groupe électrogène ;
- appareils électriques d'extérieur : fontaines de jardin, portails… (voir notre exemple à la section 8.2).

Figure 5.1.
Habitat équipé de panneaux photovoltaïques en toiture (doc. Sharp).

Appareils portables pour les loisirs

Beaucoup plus modestes et déjà passées dans les mœurs, sont les utilisations du solaire dans le domaine des loisirs : nautisme, caravaning, expéditions… Avec un ou deux panneaux solaires et de bonnes batteries, l'utilisateur pourra disposer d'une énergie indépendante pour, par exemple :

- 1 ou 2 points lumineux à usage limité dans le temps ;
- et/ou 1 petit réfrigérateur ;
- et/ou 1 recharge pour téléphone portable, une caméra vidéo…

Équipements professionnels

Dans ce domaine, la performance des produits est déterminée davantage par le service rendu que par des considérations de rendement photovoltaïque. En particulier, lorsque la maintenance d'un réseau d'appareils alimentés par piles est compliquée (difficultés d'accès) ou onéreuse (étendue du parc d'équipements). Le solaire est avant tout une tranquillité pour l'exploitant.

Un nombre grandissant de secteurs est concerné : télécommunications, sécurité et signalisation routières, télémesure, stations météorologiques, gestion des eaux, contrôles de pollution, surveillance et contrôle d'accès, mobilier urbain, éclairage, information sur la voie publique, gestion agricole (serres, irrigation…).

Figure 5.2. **Alimentation d'un relais Télécom de puissance (Maryland, États-Unis) (doc. Solarex).**

Électrification rurale

Deux à trois millions de personnes n'ont pas accès à l'électricité dans le monde et 80 % d'entre elles vivent en milieu rural. La faible densité de population rend hors de prix le raccordement au réseau électrique public.

L'énergie photovoltaïque constitue donc une énergie précieuse pour les pays en développement qui ne disposent pas de réseau électrique.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Elle permet de fournir de l'électricité aux besoins domestiques (éclairage, télévision, accès à l'eau potable), professionnels (fonctionnement de moulins à céréales, de machines à coudre, etc.) et éducatifs et médicaux (écoles, accès à l'information, dispensaires, conservateurs de vaccins, etc.).

Pompage photovoltaïque

Monter de l'eau à la surface à l'aide d'une pompe alimentée par des panneaux solaires est assez simple et efficace, surtout dans les pays bien ensoleillés. Le pompage photovoltaïque est d'ailleurs une des applications les plus répandues dans les pays du Sud, et les premières pompes « solaires » datent des années 1970.

Ces systèmes fonctionnent « au fil du soleil », l'eau est remontée dans la journée, et stockée dans une citerne placée en hauteur, qui sert de stockage. On peut donc se passer de batterie. Les **figures 5.3** et **5.4** montrent la structure d'une telle installation et un exemple au Mali.

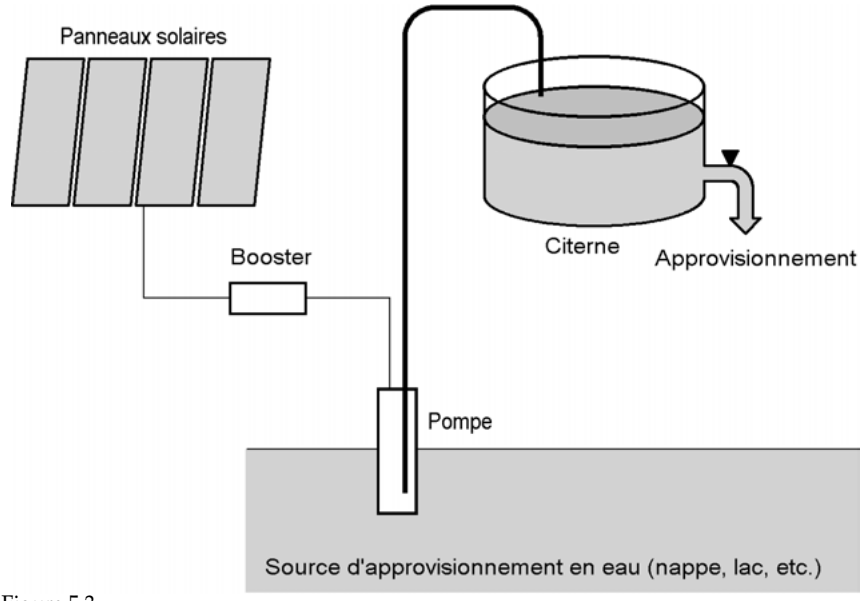


Figure 5.3.
Principe d'un système de pompage « au fil du soleil ».

Ainsi, à sa manière, l'électricité solaire est un vrai moteur de développement. Elle permet de libérer les femmes qui normalement passent beaucoup de temps à aller chercher l'eau, d'irriguer facilement les plantations, de mettre en route des activités artisanales demandant de l'électricité dans une zone non électrifiée, et d'aider à l'équipement des écoles et des hôpitaux délocalisés.

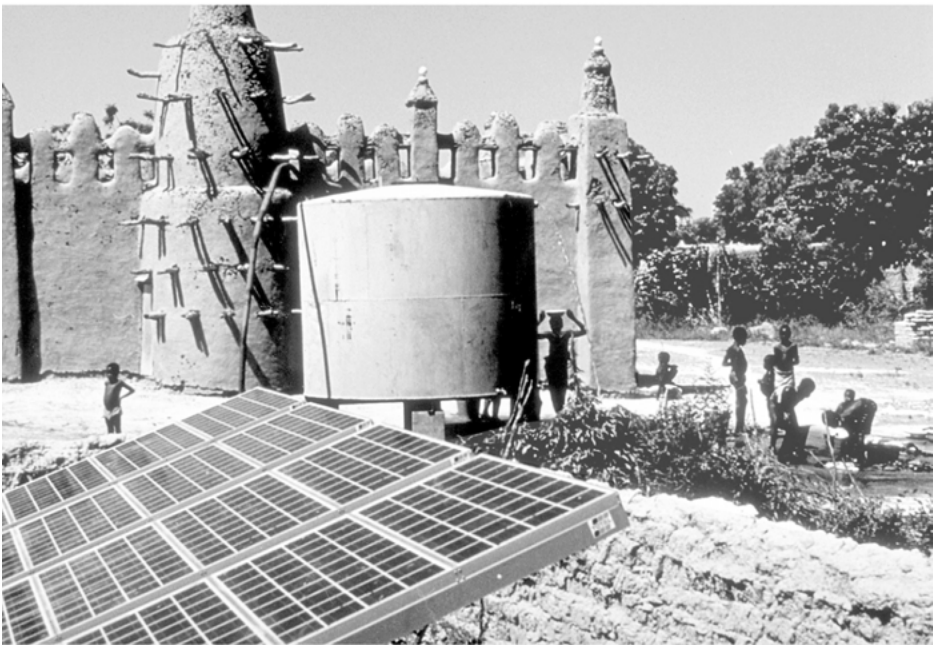


Figure 5.4. **Exemple de système de pompage au Mali.**

5.2 OPTIMISER ET ÉCONOMISER

S'il est indispensable de continuer à améliorer les rendements des éléments photovoltaïques, il ne faut pas seulement raisonner en puissance produite, mais aussi en puissance consommée.

Il est parfois moins coûteux d'investir pour économiser un watt-heure que pour en produire un supplémentaire, tout cela pour une satisfaction égale du consommateur.

Donc, quand on pense « solaire », on doit d'abord penser « faible consommation ». De plus, les composants photogénérateur, batterie et régulateur de charge, ne sont pas vraiment bon marché, il faut donc ne pas gaspiller cette énergie précieuse.

Rappelons que la consommation électrique est le produit de la puissance à fournir par le temps de fonctionnement (voir section 1.1). On s'attachera donc à réduire autant que possible la puissance et le temps de fonctionnement. Pratiquement, on favorisera :

- l'utilisation d'appareils électriques ou de composants électroniques consommant faiblement (**tableau 5.1**) ;
- un fonctionnement rationnel dans le temps.

Les exemples ci-dessous illustrent ces principes d'économie.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Choix de luminaires

Tableau 5.1. Exemples de luminaires basse consommation.

Pour obtenir de la luminosité	Puissance consommée par une lampe fluo-compacte	Puissance consommée par une lampe à incandescence
400 lumens	7 W	40 W
600 lumens	11 W	60 W
900 lumens	15 W	75 W
1 200 lumens	20 W	100 W

Choix d'appareils ménagers

Il existe aujourd'hui une classification des appareils ménagers 220 V en fonction de leur consommation électrique – la plupart d'entre eux sont désormais munis d'une « étiquette énergie », créée en 1994 par l'Union Européenne –, et il est impératif de choisir les moins gourmands en énergie si l'on envisage une installation solaire. On trouve aussi des *appareils en courant continu* (pour le froid, la télévision, la ventilation…) vendus par les professionnels de l'énergie solaire. Ces derniers sont nettement plus chers que les appareils vendus en grande surface, mais ce surcoût est souvent compensé par l'économie réalisée sur l'alimentation solaire.

Optimiser le temps de fonctionnement

Une photopile ou un panneau solaire produisent chaque jour une quantité d'énergie donnée, qu'il convient d'exploiter au mieux. Lorsque l'appareil alimenté consomme des courants forts, ce n'est pas critique s'ils sont de courte durée. Par contre, il est toujours intéressant de réduire au minimum les consommations permanentes.

Exemple :

Considérons un système de réception radio consommant 5 W.

S'il fonctionne en permanence, le système d'alimentation solaire devra lui fournir :

$$5\ \text{W} \times 24\ \text{h} = 120\ \text{Wh/jour}$$

Si l'on peut le réveiller par un signal d'appel de façon à ce qu'il reçoive ses informations pendant 1 heure par jour en moyenne, et le laisser en veille le reste du temps (avec une consommation de 0,1 W), le système d'alimentation ne devra plus apporter que :

$$(5 \times 1) + (0{,}1 \times 23) = 7{,}3\ \text{Wh/jour}$$

Le panneau et la batterie pourront être treize fois plus petits avec ce nouveau principe de fonctionnement.

Autres économies dans le temps

La logique qui doit guider l'optimisation d'un système est la suivante : « ne consommons pas d'énergie lorsque c'est inutile ». Pour ce faire, il est souvent intéressant de recourir à :

- des *détecteurs de présence* : pour mettre en route un appareil en cas de passage d'une personne ;
- des *détecteurs crépusculaires* : pour arrêter ou mettre en route un appareil quand la nuit tombe (ou quand le soleil se lève !).

Ces composants sont mis en œuvre à la section 8.1 (éclairage d'un pas de porte).

5.3 CALCUL D'UN SYSTÈME AVEC STOCKAGE

Cette section va permettre d'évaluer la faisabilité d'une application solaire avec stockage.

Mais il faut savoir que ces bilans d'énergie peuvent s'avérer plus complexes qu'ils n'y paraissent, et que pour obtenir des résultats précis et sûrs, il est préférable de les confier à un professionnel de l'énergie solaire.

Nous parlons d'abord des applications en courant continu. La question de la conversion en 220 V alternatifs sera abordée plus loin.

Les bonnes questions à se poser

- Quelle est la consommation du système sur la base de 24 h ?
- A-t-on besoin d'un stockage ? Si oui, sur quelle base de temps (voir exemples section 4.1) ?
- Quel stockage peut-on utiliser pour qu'il soit compatible avec l'application ? En capacité, en voltage ?
- De combien d'énergie solaire, ou « énergie lumière », va-t-on pouvoir disposer ?
- Quel(s) photogénérateur(s) est adapté ?

Évaluer la consommation

Pour connaître l'énergie électrique consommée par une application, établir d'abord un tableau avec les fonctions à alimenter et la durée de chacune sur 24 h, et calculer l'énergie nécessaire en Ah, mAh, ou µAh.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Le **tableau 5.2** propose un exemple de détermination d'une consommation électrique (tension nominale de fonc-tionnement : 4,8 V).

Tableau 5.2. Exemple de détermination d'une consommation électrique.

Fonction	Courant consommé	Durée par 24h	Énergie = Courant × Durée
Veille	500 µA	24 heures	500 × 24 = 12 000 µAh = 12 mAh
Marche	80 mA	30 s toutes les heures	80 × 30 × 24/3 600 = 16 mAh
TOTAL de l'énergie consommée par période de 24 h			**28 mAh**

La consommation totale journalière est de :

$$28\ \text{mAh} \times 4{,}8\ \text{V} = 134{,}4\ \text{mWh/jour}\ (\text{ou } 0{,}134\ 4\ \text{Wh/jour})$$

Remarque : si la fonction « Marche » avait été maintenue en permanence, la consommation aurait été nettement plus élevée, près de 2 Wh/jour !

Le stockage

Si l'application doit fonctionner en direct sans stockage, on prendra un photogénérateur dont la puissance maximale à l'éclairement de travail correspond à la puissance de l'appareil.

Sinon, on calcule la batterie selon le besoin d'autonomie sans soleil.

Évaluation du besoin

Pour l'extérieur, on prend généralement une autonomie sans apport solaire (*cf.* section 4.1) comprise entre 4 et 10 jours selon le climat – par exemple, 6 jours dans le Sud de la France.

En intérieur, cela dépend énormément de l'application et de son usage : le temps d'autonomie nécessaire est égal à la durée maximale d'obscurité que l'on peut rencontrer (voir section 4.1).

Détermination de la capacité de l'accumulateur

Pour déterminer la capacité de l'accumulateur, multiplier la consommation électrique en Ah de l'application par la durée d'autonomie désirée, et appliquer un coefficient de sécurité :

$$C\ (\text{Ah}) = \frac{\text{Conso. du système sur 24 h (Ah)} \times \text{Durée d'auto. en jours}}{0{,}6}$$

Remarque : ce coefficient de 0,6 est une valeur typique, qui dépend de la profondeur de décharge de l'accumulateur, et surtout de la réduction de sa capacité de stockage aux températures basses. Introduire ce coefficient revient à dire que la capacité réellement disponible sur le terrain est à tout moment égale à 60 % de la capacité nominale. On appelle *capacité utile* cette capacité réduite :

$$\text{Capacité utile} = \text{Capacité nominale} \times \text{Pourcentage utile}$$

Choix de la technologie d'accumulateur

Deux cas se présentent :

- La tension de travail est de 6 V, 12 V, 24 V, 48 V : le choix sera un stockage en batterie Plomb pour les capacités de 2 Ah et plus ; NiCd pour les capacités inférieures à 2 Ah (ou pour les grosses capacités si une très haute fiabilité est nécessaire).
- La tension de travail est un multiple de 1,2 V (1,2 V ; 2,4 V ; 3,6 V ; 4,8 V…) : le choix s'orientera vers un NiCd et se limitera à des températures positives.

Autres contraintes

D'autres considérations peuvent conditionner le choix d'un accumulateur :

- autodécharge (si la batterie a de l'autodécharge, il faut la rajouter à la consommation du système) ;
- tenue en température ;
- durée de vie ;
- poids, volume disponible ;
- degré d'entretien (les batteries au Plomb « ouvert » demandent un entretien 1 à 2 fois par an du niveau d'électrolyte).

Exemple :

Consommation : 28 mAh sous 4,8V → accumulateur NiCd 4 éléments (4 × 1,2 V).

Capacité nécessaire pour 10 jours d'autonomie :
(28 mAh × 10)/0,6 → 450 à 500 mAh.

Évaluation de l'énergie solaire (ou lumineuse) récupérable

En intérieur

On rencontre des éclairements extrêmement variables : de 0 à 1 000 lux en éclairage normal, de 10 000 à 20 000 lux, voire 50 000 lux sous une lampe intense (voir **figure 2.9** et valeurs à la section 2.3).

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Sauf exception, on prend 200 lux pour un environnement intérieur « standard » et 1 000 lux pour un éclairement intérieur « élevé ».

Pour mieux maîtriser l'environnement normal de travail d'une application, utiliser un luxmètre. Le montage de la section 7.3 en décrit la fabrication.

En extérieur

Pour faire un calcul précis, il faut recourir aux données statistiques météo (voir section 2.2, Rayonnement global intégré) et souvent confier les calculs détaillés à un professionnel. Un essai, aussi long soit-il en extérieur, est rarement concluant. Faisait-il beau ce jour-là ? Le mois d'essai était-il particulièrement mauvais en ensoleillement ?

Pour établir un ordre de grandeur, nous utiliserons les quelques données pour la France fournies à la section 2.2.

Le(s) photogénérateur(s)

Choix de la tension de fonctionnement

En alimentation directe (sans stockage), la tension de fonctionnement (V_{load}) du photogénérateur à l'éclairement de travail doit être celle du fonctionnement de l'application.

En charge de batterie, la tension du photogénérateur sera choisie en fonction de *la tension de charge* des accumulateurs :

- NiCd : tension nominale par élément 1,2 V, tension de charge 1,4 V ;
- plomb : tension nominale par élément 2 V, tension de charge 2,2 à 2,3 V.

On ajoutera 0,6 V pour tenir compte de la diode anti-retour en série (voir section 4.4).

Exemples :

Pour une charge de 3 × NiCd en série, de tension nominale 3,6 V, la tension de fonctionnement du photogénérateur sera de :

$$1{,}4 \times 3 + 0{,}6\ \text{V} = 4{,}8\ \text{V}$$

Pour une charge d'une batterie plomb 12 V (6 éléments en série), la tension de fonctionnement du photogénérateur sera de :

$$2{,}3 \times 6 + 0{,}6\ \text{V} = 14{,}4\ \text{V}$$

Puissance du photogénérateur

En extérieur

On peut calculer de manière approchée la puissance en W_c du photogénérateur nécessaire. Rappelons que la puissance-crête d'un panneau solaire est celle qu'il débite sous un ensoleillement de 1 000 W/m² à 25 °C sous un spectre solaire AM 1,5. Pour calculer cette puissance :

- Choisir un site météo aussi proche que possible de l'application.
- Prendre la valeur d'ensoleillement global journalier (en kWh/m².jour) la plus défavorable de la période de fonctionnement, à l'orientation et l'inclinaison choisie pour le panneau (par exemple, en décembre pour une utilisation annuelle, en avril ou octobre pour une utilisation estivale).
- On considère alors que cette journée dure *N* heures, avec un ensoleillement de 1 000 W/m².
- Comme le panneau débite sa puissance crête à cet ensoleillement de 1 000 W/m², il le fera pendant l'équivalent de *N* heures au cours de cette journée et on calcule donc la puissance nécessaire de la façon suivante :

$$P(W_c) = \frac{\text{Wh demandés}}{N \text{ heures} \times C_p}$$

Puissance crête du panneau =

$$\frac{\text{Consommation journalière de l'application}}{\text{Nb d'heures équivalentes d'ensoleillement} \times \text{Cœff. de pertes}}$$

C_p, coefficient de perte, peut être compris entre 0,5 et 0,8, selon les technologies et les niveaux d'ensoleillement instantanés du site considéré.

Prenons l'exemple d'une utilisation annuelle à Paris, en orientation Sud à 60° par rapport à l'horizontale (exposition idéale à cette position géographique). L'ensoleillement global journalier en décembre est de 1,12 kWh/m² (c'est une intégrale). On l'assimile à 1,12 h × 1 000 W/m². Donc, pour un besoin de 20 Wh/jour sous 12 V par exemple, il faudra un photogénérateur 12 V de :

$$P = \frac{20}{1{,}12 \times 0{,}7} = 25 \text{ W}_c \text{ minimum}$$

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

En intérieur

Le principe est le même, mais on raisonnera avec un éclairement fixe pendant un certain temps (1 000 lux pendant 8 h/jour ou 200 lux permanent…).

Le courant que devra fournir le photogénérateur sera donc :

$$I_{load} \text{ (sous l'éclairementde travail)} = \frac{\text{Consommation du système sur 24 h (Ah)}}{\text{Nb heures par jour d'exposition (h)} \times C_p}$$

Par exemple, pour une consommation électrique du système de 1,2 mAh, et une exposition de 10 h par jour sous 1 000 lux, la photopile devra fournir, sous 1 000 lux, un courant de fonctionnement de :

$$I = \frac{1{,}2}{10 \times 0{,}6} = 0{,}2 \text{ mA} = 200 \text{ µA}$$

Dimension du photogénérateur

Panneaux au silicium cristallin (5 à 120 W_c)

Ces panneaux ont entre 10 et 15 % de rendement en conditions STC (au soleil sous 1 000 W/m²) sur la surface totale du panneau (en comptant les cadres, espacements entre cellules…), d'où :

- 200 W_c → panneau de 1,5 m² (par exemple 1,4 m × 1,1 m) ;
- 50 W_c → panneau de 0,4 m² (par exemple 60 cm × 65 cm) ;
- 20 W_c → panneau de 0,15 m² (par exemple 50 cm × 30 cm).

Panneaux au silicium amorphe (0 à 30 W_c)

Compter environ 2 fois les dimensions ci-dessus pour un fonctionnement sous fort ensoleillement :

- 5 W_c → panneau de 30 × 35 cm (0,1 m²) ;
- 1 W_c → panneau de 15 × 15 cm (225 cm²).

Remarque : ces photogénérateurs pour l'extérieur sont en général adaptés à la charge de batteries plomb 12 V, parfois 6 V ou 24 V, ou NiCd 7,2 V.

Photopiles pour usage intérieur

Ces photogénérateurs ont le plus souvent une vocation « électronique » et sont disponibles sous différentes tensions.

Leurs dimensions en fonction des besoins en courant et en tension seront choisies avec le fabricant selon ses possibilités. Néanmoins, on peut les estimer avec les règles ci-dessous :

Pour la tension de fonctionnement, compter 0,3 à 0,4 V par cellule en fonctionnement entre 200 et 1 000 lux. Rappelons que ces photopiles sont constituées de plusieurs cellules mises en série par rayage laser. On les appelle donc aussi des « bandes », en raison de leur forme rectangulaire.

Pour le courant par unité de surface, compter 60 µA/cm^2 par bande à 1 000 lux et 10-12 µA/cm^2 à 200 lux. Majorer ensuite la surface de 15 % pour les contacts et les bordures.

Prenons l'exemple d'une photopile 12 bandes pour 3 éléments NiCd (tension de charge 4,8 V, tension de fonctionnement photopile à 1 000 lux : 12 × 0,4 V = 4,8 V). Pour disposer de 200 µA/4,8 V à 1 000 lux, il faut :

$$12 \text{ bandes} \times (200\ \mu A)/(60\ \mu A/cm^2) = 12 \times 3{,}3 \text{ cm}$$
$$= 39{,}6\ cm^2 + 15\ \%$$
$$\rightarrow 45\ cm^2$$

Et si l'appareil à alimenter est en 230 VAC ?

Tout générateur photovoltaïque est en continu au départ. Pour disposer d'énergie en 220 VAC (comme la plupart de nos appareils domestiques), il faut convertir ce courant continu en courant alternatif. On prendra un convertisseur DC/AC (ou *onduleur*) adapté en tension et en puissance et on le placera en amont de l'appareil à alimenter. Ce convertisseur n'ayant pas un rendement de 100 %, il faudra majorer la consommation pour dimensionner le panneau.

Exemple : une consommation de 100 Wh/jour en 220 VAC alimentée à travers un convertisseur de rendement 85 % devra être calculée sur la base de 100 Wh/0,85 = 117,6 Wh en courant continu.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

6 GÉNÉRATEURS PHOTOVOLTAÏQUES RACCORDÉS AU RÉSEAU – TOITS ET CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

6.1 LES PRINCIPALES APPLICATIONS

Bâtiment raccordé au réseau

Actuellement (en France, depuis 2002), il est possible de raccorder des systèmes photovoltaïques au réseau, au moyen de panneaux solaires implantés sur une habitation (ou sur un local industriel). Et l'électricité ainsi produite peut être revendue à la compagnie de distribution d'électricité.

Les panneaux photovoltaïques sont généralement installés en toiture, comme sur la figure 5.1, puis reliés à un onduleur DC/AC spécialement homologué qui produit du 230 VAC (ou plus selon le type de raccordement).

Moyennant un contrat spécifique de rachat, l'énergie électrique ainsi produite est injectée sur le réseau, au travers d'un compteur, et les kWh fournis sont rachetés par la compagnie au producteur photovoltaïque.

C'est une utilisation du photovoltaïque qui s'est développée très rapidement depuis quelques années, surtout en Allemagne, au Japon et aux États-Unis, et qui représentent la majorité des nouvelles installations au niveau mondial.

Installer un toit photovoltaïque aujourd'hui, c'est plus souvent un choix plutôt éthique qu'économique, un pari sur l'avenir.

Ce concept, limité en France à 3 kW pour les maisons individuelles (20-25 m^2 de panneaux) se décline aussi avec des puissances nettement supérieures (quelques centaines de kW par exemple)

sur des locaux industriels, commerciaux ou agricoles (entrepôts, granges, supermarchés…).

Centrales solaires

Le réchauffement climatique et les craintes de pénurie énergétique ont même conduit certains États à aller nettement plus loin dans les équipements photovoltaïques : on ne compte plus maintenant les grandes centrales au sol de plusieurs dizaines de MW occupant des hectares entiers, voire des km^2. L'Allemagne et les États-Unis sont les pionniers de ces grandes centrales (**figure 6.1**). D'autres, comme l'Espagne et le Portugal ont suivi, on trouvera de nombreuses photos et descriptions sur Internet.

Figure 6.1.
***Bavarian solarpark* en Allemagne.**

Bien sûr les investissements sont considérables, mais lorsque l'électricité est chère, et l'ensoleillement abondant (en Californie, ou dans le Sud de l'Europe par exemple) on arrive parfois jusqu'à la « parité » par rapport au kWh électrique produit par des centrales électriques classiques (au fuel ou au charbon), c'est-à-dire que l'énergie photovoltaïque est produite à un coût comparable.

Et dans les régions du globe où le réseau est peu développé, c'est sans doute une solution d'avenir également, avec des centrales

plus petites, adaptées au cas par cas. Car le photovoltaïque est très modulaire, on peut le dimensionner très précisément en fonction des besoins.

6.2 LE CONCEPT DU RACCORDEMENT AU RÉSEAU

Lorsqu'un ensemble de panneaux solaires est raccordé au réseau au lieu de charger une batterie, cela présente certains avantages :

- Le système n'a pas besoin de batteries.
- Toute l'énergie produite est récupérée, puisque le réseau se comporte comme un stockage illimité.
- L'utilisateur produit une énergie « propre » qui la plupart du temps ne couvre pas toutes ses consommations, mais il peut consommer aussi l'électricité fournie par le réseau en complément.

Le rachat du courant

En pratique, les habitations raccordées sont munies de deux compteurs, un pour l'énergie sortante, un autre pour l'énergie entrante : la totalité du courant produit est injectée sur le réseau au travers d'un onduleur, et la totalité du courant consommé est fournie par le réseau. La compagnie d'électricité facture la différence.

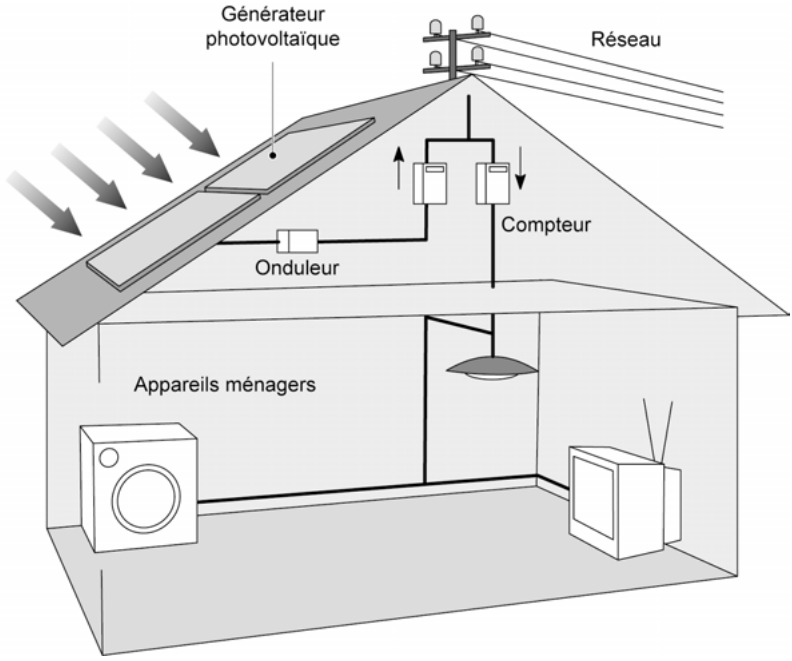


Figure 6.2.
Principe du toit solaire photovoltaïque

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Bien sûr, tout ceci n'est possible que dans les pays où la législation le permet. En France, le kilowattheure d'électricité photovoltaïque est vendu par le producteur à un tarif fixé par arrêté. L'EDF et les entreprises locales de distribution sont tenues à cette obligation d'achat et sont remboursées en partie par le fond CSPE (Contribution au Service Public de l'Électricité). Les contrats portent sur 20 ans, ce qui permet au producteur de rentabiliser son investissement.

Le **tableau 6.1** montre comment ce tarif varie selon le type d'installation et le lieu où elle est implantée. Le plus élevé s'applique aux installations « intégrées au bâti » donc pour en bénéficier, il faut que les panneaux fassent partie intégrante de la construction, et non pas « surimposés » en terrasse ou posés au sol.

Tableau 6.1. Tarifs de rachat du courant photovoltaïque en France (2010).

	Tarif d'achat applicable en 2010 (€/kWh)
Intégration	0,58 pour les habitations, les bâtiments d'éducation et de santé 0,50 pour les autres
Intégration simplifiée	0,42
Autres, métropole	0,314
Autres, DOM-TOM et Corse	0,40

Quelques précautions indispensables

Pour éviter toute mauvaise surprise, il convient de faire attention aux aspects suivants :

- Qualité des panneaux solaires : un grand producteur est toujours préférable, car il permet de fournir des panneaux de qualité (il existe des producteurs incompétents) et d'assurer *a priori* un service après vente pendant les vingt ans du contrat. Céder à des prix très bas est un pari risqué.
- Qualité de l'intégration au bâtiment pour éviter tout problème d'étanchéité. Des dispositifs sérieux comme le SOLRIF évitent tout désagrément.
- Prise en compte des ombrages : si tous les panneaux sont montés en série, et que l'un d'entre eux est à l'ombre, cela fait chuter le courant dans toute la chaîne, c'est comme si tout le champ était à l'ombre. Cela peut mener à une production bien inférieure aux prévisions. Dans ces cas d'ombres portées, si on ne peut pas s'en débarrasser (en coupant les arbres par exemple), il faut impérativement subdiviser le champ de panneaux en plusieurs parties montées en parallèle.

- Choix judicieux de l'onduleur : bien que l'investissement soit inférieur aux panneaux solaires, cet organe est essentiel au bon fonctionnement de l'ensemble car c'est lui qui met en forme le courant pour l'injecter sur le réseau.
- Choix de l'installateur : en France, le label QUALI'PV est là pour garantir sa compétence.

6.3 ÉNERGIE PRODUITE ET RENTABILITÉ

Les panneaux du commerce adaptés à la connexion réseau sont de puissance 70 à 300 W_c selon les constructeurs et les technologies. Pour une habitation individuelle, sachant que la loi limite l'installation à 3 kW_c, on peut par exemple placer :

- 14 panneaux au silicium cristallin de 210 W_c de 1,5 m^2 chacun (14 % de rendement), pour une surface totale de 21 m^2 et une puissance de 2 940 W_c,
- ou 40 panneaux au CdTe de 75 W_c de 0,95 m^2 chacun (8 % de rendement), pour une surface totale de 38 m^2 et une puissance de 3 000 W_c.

Bien sûr, le rendement étant inférieur dans le deuxième cas, la surface occupée est plus importante. Mais le coût par W_c de ces panneaux étant inférieur, cela peut s'avérer intéressant si l'on dispose de suffisamment de surface de toiture.

La production effective de ces champs de panneaux dépend de nombreux paramètres : lieu géographique, saison, orientation et inclinaison des panneaux. Des logiciels comme PVSYST simulent tous ces cas de figure. Et on trouve plus souvent en France des panneaux en couche mince, pour la même quantité de W_c installés, car ils sont meilleurs aux faibles ensoleillements, très fréquents en France métropolitaine en tout cas.

La carte de la **figure 6.3** donne pour la France la production annuelle typique d'un champ photovoltaïque, en kWh d'électricité produits par kW_c installé. Pour une installation de 3 kW_c, il faut donc multiplier par 3 pour connaître sa production annuelle. Attention, ces chiffres ne sont valables que pour une orientation optimale (vers le Sud) et une inclinaison idéale (30° par rapport à l'horizontale).

Regardons la rentabilité de ce système à l'aide d'un bilan financier sur 20 ans pour une installation typique située dans le Centre de la France, intégrée au bâti, avec une exposition optimale des panneaux (chiffres 2010 pour un particulier).

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Compte tenu du prix des panneaux (3 à 4 €/W_c), de l'onduleur (4 000 €) et du reste du système (câblage, membrane d'étanchéité, installation comprise), l'installation revient au minimum à 6,5 €/W_c soit 19 500 €. Il faut ajouter la TVA, les frais de raccordement au réseau, l'onduleur de remplacement au bout de 10 ans, et les quelques dépenses d'entretien (nettoyage des panneaux).

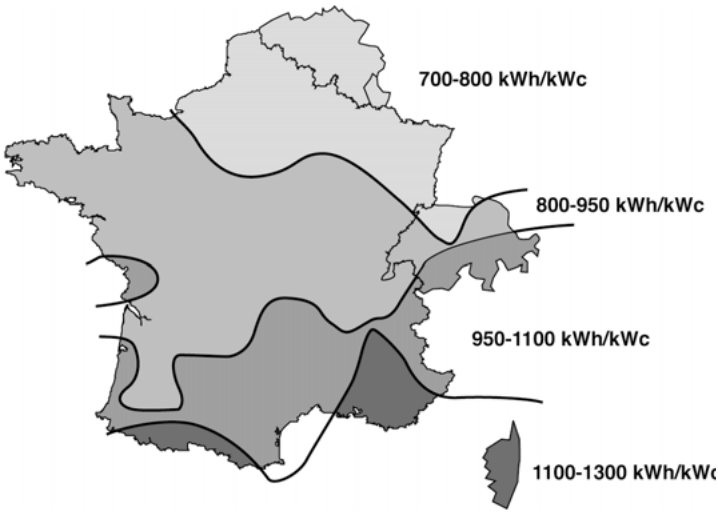


Figure 6.3.
Production annuelle d'un toit photovoltaïque de 1 kW_c idéalement exposé.

Du côté des recettes, la production annuelle est estimée à 950 kWh/kW_c soit 2 850 kWh/an. En appliquant le tarif de 58 c€/kWh, on arrive à un revenu annuel de 1 653 € HT/an. Nous faisons un bilan dans le **tableau 6.2** avec des hypothèses réalistes de subventions et de crédit d'impôt.

De plus, dans l'hypothèse où tout se soit bien passé et qu'aucune dégradation ni dépenses imprévues n'aient surgi, le système apporte des revenus nets après la période d'amortissement. Dans notre exemple, lors des dernières années, le système rapporte un revenu net de l'ordre de :

$$1\,453 \times 9 = 13\,077 \text{ € au total}$$

(soumis aux ajustements du tarif dans le temps figurant sur le contrat de rachat).

Pour en savoir plus, voir par exemple l'ouvrage *Énergie solaire photovoltaïque*, d'Anne Labouret et Michel Villoz (Dunod, 4e édition, 2009), beaucoup plus détaillé sur le sujet.

Pour l'aspect réglementaire, voir les sites de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et du Syndicat des énergies renouvelables (SER-SOLER), et le site www.photovoltaique.info ou www.outilssolaires.com/regions/default.htm pour les informations région par région.

Dépenses	
Installation initiale (HT)	19 500 €
TVA (5,5 %)	1 072 €
Raccordement réseau	900 €
Onduleur de remplacement	4 000 €
Coût fixe total	25 472 €
Dépenses annuelles d'entretien	200 €/an
Recettes	
Revente du courant produit	1 653 €/an
Subvention régionale*	1 300 €
Crédit d'impôt*	8 400 €
Bilan	
Total des investissements	25 472 – 1 300 – 8 400 = 15 772 €
Bilan du revenu annuel	1 653 – 200 = 1 453 €/an
Temps de retour sur investissement	15 772/1 453 = 11 ans*

Tableau 6.2. Exemple de rentabilité d'une installation photovoltaïque domestique raccordée au réseau (3 kW_c – Centre de la France – exposition idéale).

* Ce n'est qu'un exemple, les subventions dépendent des régions et le crédit d'impôt est à considérer en fonction de la situation familiale. Évidemment la rentabilité est un peu longue, mais la région choisie n'est pas très ensoleillée.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

7 MONTAGES ÉLECTRONIQUES AVEC DES CELLULES SOLAIRES

Nous allons aborder dans ce chapitre des applications « électroniques » de faible puissance alimentées par des photopiles.

Faisons d'abord quelques mesures avec cette photopile.

7.1 BANC D'ESSAI DE LA PHOTOPILE

On prendra, pour cette première expérimentation, une photopile de type silicium amorphe SOLEMS de référence 05/048/016, de dimensions 48 × 16 mm, avec 5 bandes en série.

Câblage de la photopile

Les photopiles sont livrées non câblées. On observe une face active (rainurée) à exposer à la lumière, et une face destinée au câblage (**figure 7.1**).

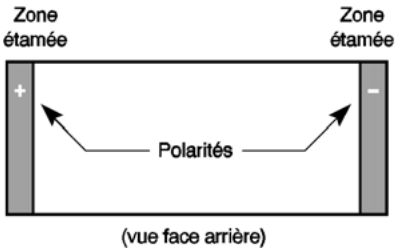


Figure 7.1. **Vue arrière d'une photopile 05/048/016.**

Cette dernière présente à chaque extrémité une partie étamée ; c'est là que l'on soude avec précaution les fils de câblage :

- déposer d'abord de l'étain sur l'extrémité des fils ;
- choisir un fil de couleur rouge pour le côté positif (+), le souder à 300 °C maximum en procédant rapidement ;
- répéter l'opération avec un fil noir ou bleu côté négatif (–).

La cellule est prête à être utilisée.

Mesures de la photopile

Afin de se familiariser avec les mesures sur une photopile, nous proposons ici des montages permettant de mesurer ses caractéristiques.

Se référer à la description d'une courbe courant-tension (section 3.3).

Mesure de la tension de circuit ouvert (U_{co})

Utiliser un multimètre, de préférence digital, et placer le commutateur en position volts continus. Brancher le fil noir du multimètre sur *commun*, le fil rouge du multimètre sur V ; connecter la cellule en respectant la couleur des fils, le voltmètre doit afficher une valeur positive (**figure 7.2**).

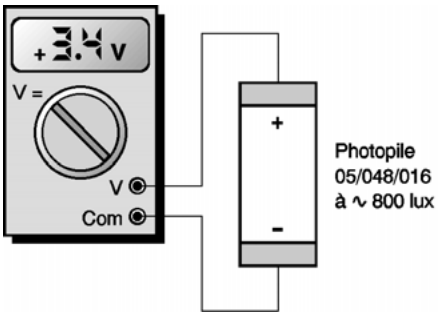


Figure 7.2.
Mesure de la tension de circuit ouvert.

Lorsque l'on modifie l'éclairement de la cellule, la tension varie en conséquence.

On mesure alors la tension de circuit ouvert U_{co} de la cellule solaire.

Pour la photopile 05/048/016, pour un éclairement de 800 lux (sous une lampe de bureau), on obtient U_{co} = 3,4 V.

EN SAVOIR PLUS

Cette tension est d'abord proportionnelle au nombre de bandes présentes sur la photopile, ici 5. Car ces bandes sont des cellules élémentaires mises en série grâce aux rayures effectuées sur les couches minces constituant la photopile (*cf.* **figure 3.5**) : donc

leurs tensions s'ajoutent (*cf.* section 1.3). La tension de circuit ouvert de chaque bande peut donc être calculée ici pour l'éclairement considéré :

3,4 V/5 bandes = 0,68 V/bande

Cette tension de circuit ouvert dépend ensuite de l'éclairement, non pas de façon proportionnelle, mais logarithmique. Et dans le cas du silicium amorphe, jusqu'à des éclairements très bas, comme c'est expliqué à la section 3.3, tableau 3.1.

Mesure du courant de court-circuit

Avec cette fois un ampèremètre on peut mesurer le courant de court-circuit I_{cc} (courant maximal à tension nulle). Le câblage est similaire au précédent : fil noir sur « commun », fil rouge sur « courant continu » ou « mA » (**figure 7.3**), le commutateur en position courant, sur le calibre le plus sensible (2 mA si possible).

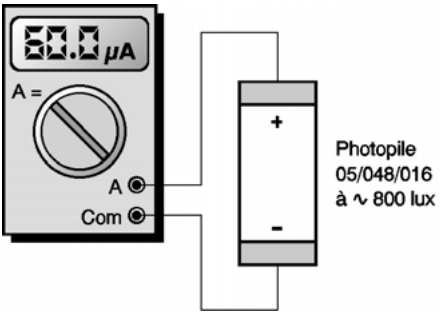


Figure 7.3.
Mesure du courant de court-circuit.

Ce courant I_{cc} est encore plus sensible que la tension U_{co} aux variations d'éclairement, car il y est directement proportionnel. C'est cette propriété que nous utiliserons dans le montage « luxmètre » (voir section 7.3).

Pour la photopile 05/048/016 :

- éclairement 800 lux → $I_{cc} \approx 60$ µA ;
- éclairement 200 lux → $I_{cc} \approx 15$ µA.

En déplaçant la photopile, avec l'ampèremètre, on a déjà un aperçu des grandes variations de l'éclairement selon l'emplacement (près d'une fenêtre, sous une lampe, dans la pénombre…).

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

EN SAVOIR PLUS

Ce courant proportionnel à l'éclairement est également proportionnel à la surface de chaque bande (ou cellule élémentaire) de la photopile, avec une valeur typique de 8 mA/cm² à 100 000 lux pour une cellule au silicium amorphe.

La règle de calcul est donc la suivante :

$$I_{cc} = 0{,}08\ \mu A \cdot E \cdot S$$

où I_{cc} est le courant de court-circuit en µA, E l'éclairement en lux, et S la surface active d'une cellule élémentaire en cm².

On appelle *surface active* la surface effectivement utile à la conversion photovoltaïque, en excluant les contacts et les zones de rayures.

Donc ici, pour une photopile 05/048/016, dont les bandes ont une surface active de 0,95 cm² chacune, on a, pour 800 lux :

$$0{,}08\ \mu A \times 800\ lux \times 0{,}95\ cm^2 = 61\ \mu A$$

Pour une surface de photopile donnée, on a donc une répartition en courant et tension selon le nombre de bandes et leur surface. Avec beaucoup de bandes en série, la photopile débite plus de tension, et moins de courant (car les bandes sont petites), et avec peu de bandes en série, c'est l'inverse, on a moins de tension et plus de courant. C'est le produit courant × tension (la puissance) qui est constant avec la surface à un éclairement donné.

Comparons deux photopiles de surface identique (48 × 16 mm) avec 5 ou 7 bandes :

Sous 1 000 lux

Photopile 05/048/016
5 bandes Surface/bande = 0,95 cm² I_{cc} = 75 µA U_{co} = 3,5 V

Photopile 07/048/016
7 bandes Surface/bande = 0,64 cm² I_{cc} = 50 µA U_{co} = 5 V

Le produit $U_{co} \cdot I_{cc}$ de la photopile 7 bandes est légèrement inférieur à cause de l'encombrement des rayures.

Mais attention, la puissance en fonctionnement n'est pas égale au produit $U_{co} \cdot I_{cc}$, car la cellule n'est pas parfaite (voir ce qui suit et la **figure 3.9**).

Courant et tension sous charge

Pour que la photopile débite de la puissance (jusqu'ici, on avait un voltage ou un courant, mais pas les deux ; or $P = UI$, donc la puissance était nulle), on va la câbler sur une résistance dans laquelle elle va débiter. Comment calculer cette résistance pour débiter un maximum de puissance ?

Dans un premier temps, prenons :

$$R_c = U_{co}/I_{cc}$$

soit, pour la photopile 05/048/016 à 800 lux :

$$R_c = 3{,}4\text{V} / 60\ \mu\text{A} \approx 57\ \text{k}\Omega$$

On ne travaillera ainsi pas nécessairement au point de puissance maximale P_m, mais au moins à proximité, comme le montre la **figure 7.4**.

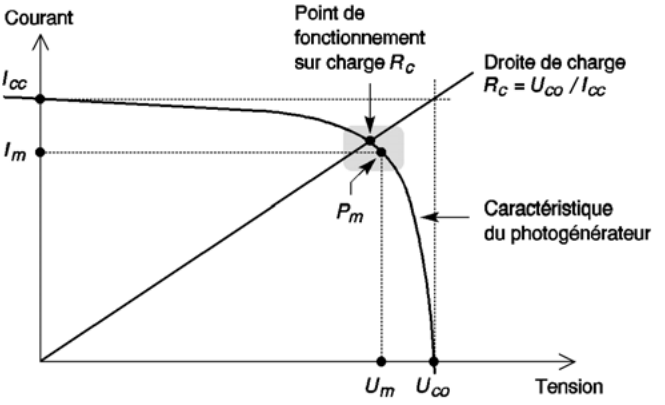


Figure 7.4.
Calcul approché d'une charge optimale.

Le point de fonctionnement obtenu I_l (pour I_{load} en anglais ou *courant sous charge*) sous une tension V_{load} (tension sous charge) peut être mesuré en insérant ampèremètre et voltmètre dans le circuit, selon le montage **figure 7.5**.

Ce banc de test permet de repérer aussi d'autres points de fonctionnement de la courbe courant-tension, et même de la tracer en totalité : il suffit de faire varier la charge R_c.

Mais pour que le résultat soit correct, deux précautions :

- veiller à ce que l'ampèremètre soit assez sensible ou se placer à un éclairement plus fort ;
- maintenir un éclairement constant pendant les mesures (ne pas faire d'ombre à la photopile notamment).

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

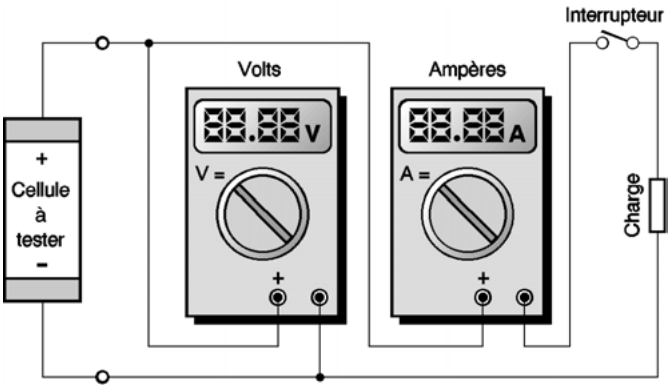


Figure 7.5.
Montage de mesure courant-tension.

7.2 MÉLODIE LUMINEUSE

Débutons les montages par une touche de musique dénommée Mélodie Lumineuse : le circuit décrit ci-après active, dès que l'éclairement est suffisant, une mélodie produite par un circuit intégré spécialisé. C'est ce genre de composant que l'on rencontre notamment dans les cartes d'anniversaire, les jouets et les cadeaux surprises.

Le constructeur UMC propose une variété de modèles sous le nom générique de « Simple Melody Generator », au sein de la série UM66T.

Parmi les modes de fonctionnement disponibles, nous avons préféré le modèle *one-shot* (la mélodie s'exécute une fois puis s'interrompt automatiquement après l'exécution de la dernière note) au modèle *level-hold*, fonctionnement maintenu pour lequel l'arrêt est provoqué par la coupure de l'alimentation. Dans les deux versions, la mélodie démarre ou redémarre à la mise sous tension du circuit.

Les signaux de sons visualisables à l'oscilloscope sont disponibles sur la broche de sortie notée O/P. Le circuit génère la mélodie mais ne produit pas le son, il faut lui connecter un buzzer piézo-électrique, ou bien un haut-parleur.

La première solution convient mieux à l'alimentation solaire, car il est possible de trouver des buzzers de forte impédance, donc de faible consommation (100 µA), présentant un niveau de son parfaitement audible.

Il ne faut pas cependant s'attendre à de la haute fidélité, le niveau d'amplitude des graves ne risquant pas de faire trembler les fenêtres, les aigus, eux, étant mieux retransmis.

Le circuit générateur de mélodie présente une consommation faible sur une large plage d'utilisation en tension (1,3 V à 3,3 V), ces propriétés sont obtenues par la réalisation du circuit en technologie CMOS.

Ces deux propriétés font que cette technologie est la plus adaptée aux alimentations solaires en général, et aux applications solaires sans sauvegarde d'énergie en particulier. En effet, pour ces composants, l'évolution du point de fonctionnement du montage peut suivre la caractéristique courant-tension de la cellule, le sacro-saint régulateur de tension destiné à maintenir une tension stable ne s'avère donc pas nécessaire.

Par la nature de la fonction réalisée (nous pouvons la classer dans les loisirs), le stockage par accumulateurs ou condensateurs pour les périodes de faible éclairement et la nuit est inutile.

Il s'ensuit des réductions de coût et une augmentation de la durée de vie du montage, car c'est très souvent la fonction de stockage qui pénalise les alimentations solaires.

On emploie donc ici une alimentation simple, « au fil du soleil », économique et inusable ! Pas de pile, pas de composant de stockage à recharger, juste l'énergie solaire convertie en énergie électrique en temps réel.

En présence d'une source de lumière minimale (voir dimensionnement), la mélodie se fait entendre instantanément. La mélodie achevée, le montage sera réactivé en maintenant un potentiel nul aux bornes du circuit. Cela est habituellement réalisé par action sur un bouton poussoir relié à la masse. Dans notre application, ce « reset » du circuit peut être obtenu sans composant supplémentaire, en maintenant la cellule quelques secondes dans le noir.

Placer par exemple le montage dans un tiroir, le cacher sous un objet ou un tissu bien opaque, ou refermer la carte postale où il a été placé… Le but : annuler la tension de la cellule. En retirant l'objet maintenu sur la cellule, la mélodie reprendra comme par magie !

Attention : généralement, le fait de placer la main sur la cellule est insuffisant pour opérer un reset, des bribes de lumière réussissent à passer par les tranches de la cellule et suffisent à maintenir un potentiel non nul.

Schéma du montage

Le schéma de principe de la mélodie lumineuse est présenté à la **figure 7.6**.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

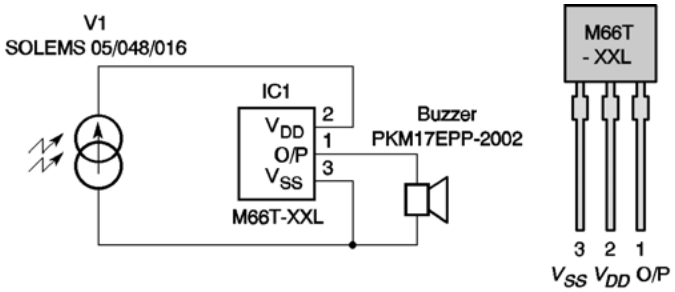


Figure 7.6. **Schéma de principe de la mélodie lumineuse.**

Tableau 7.1. Liste des circuits disponibles en version One-Shot.

Référence	Titre de la mélodie
M66T- 01L	We wish you a merry Christmas
M66T- 05L	Home Sweet home
M66T- 09L	Wedding March
M66T- 19L	For Alice
M66T- 68L	It's a small world

Le circuit intégré M66T est disponible en boîtier TO-92.

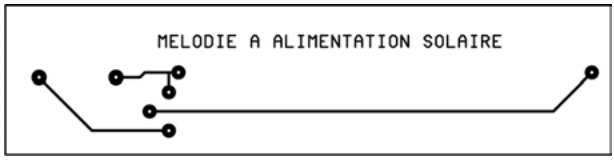
Dimensionnement de la cellule solaire

Le montage consomme au maximum 300 µA (sous 3 V), soit une puissance de 1 mW, ce qui est produit par une photopile 05/048/016 sous un éclairement d'environ 5 000 lux. Mais il démarrera à un éclairement plus faible : à 1 000 lux environ (ce qui correspond à une pièce bien éclairée), la mélodie sera simplement moins puissante).

Réalisation du montage

Le tracé du circuit imprimé et l'implantation des composants de la mélodie lumineuse sont proposés sur les **figures 7.7** et **7.8**.

Figure 7.7. **Tracé du circuit imprimé.**



Liste des composants
IC_1 : M66T-XXL, UMC
Cellule solaire : 05/048/016, Solems
Buzzer Piezzo : PKM17EPP-2002
2 fils de câblage

Figure 7.8. **Implantation des composants.**

7.3 LUXMÈTRE

Présentation du montage

Le luxmètre tire partie de la sensibilité de la photopile aux faibles éclairements et de la linéarité du courant de court-circuit (I_{cc}) sur une grande dynamique d'éclairement. Ces deux caractéristiques font de la photopile un capteur d'éclairement faible coût, qui permet de réaliser un luxmètre précis et de qualité sur une plage de mesure de 4 décades, 10 à 100 000 lux. Le circuit de mesure, composé de 2 amplificateurs opérationnels, effectuera la conversion lux/volts, en 2 gammes. Cette conversion permet l'emploi d'un voltmètre de qualité courante pour la lecture de l'information.

Nous utiliserons également la photopile en générateur électrique afin d'alimenter le luxmètre. L'énergie électrique générée sera stockée dans un condensateur de forte valeur (supercondensateur) afin d'assurer un fonctionnement d'au moins 45 min, pour une décharge du condensateur de 0,15 V.

La référence de tension nécessaire à la mesure sera obtenue par un régulateur 3 V de faible consommation.

Dès que la tension du condensateur de stockage atteint 3,15 V, la broche *enable* du superviseur active le régulateur, la tension devient disponible à la sortie du régulateur. Le clignotement de la LED L1 signale que le montage est prêt à être utilisé.

Ces deux fonctions distinctes étant exclusives l'une de l'autre, la fonction mesure et la fonction générateur seront obtenues suivant la position d'un interrupteur.

Position 1 : générateur électrique
La photopile charge le condensateur *C*, un régulateur 3 V maintient une tension constante aux bornes du circuit de mesure. La cellule sera placée dans un endroit bien éclairé, pour permettre une recharge rapide du condensateur de stockage.

Position 2 : capteur d'éclairement
Le courant de la photopile alimente la résistance *R* et fournit une tension U_{mes} au circuit de mesure. Le circuit de mesure opère une conversion lux/volts, la tension de mesure résultante (U_e) présente à sa sortie sera lue sur un voltmètre.

La **figure 7.9** présente le synoptique simplifié du luxmètre et de son alimentation solaire.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

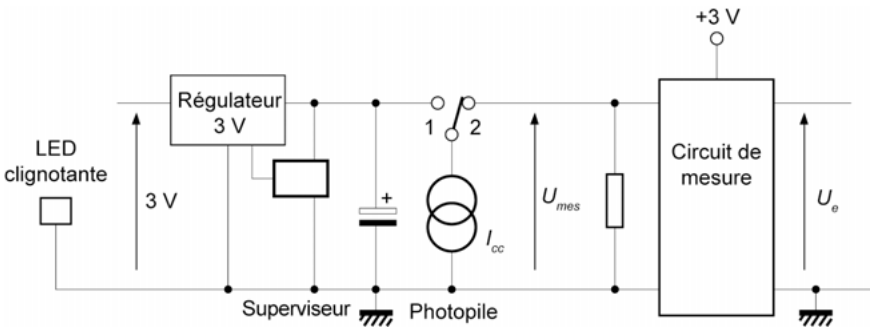


Figure 7.9.
Synoptique simplifié du luxmètre et de son alimentation solaire.

Nous utiliserons une photopile standard, capable de fournir une tension en circuit ouvert compatible avec la tension de fonctionnement des condensateurs de stockage de type mémoGuard.

Ces condensateurs admettent une tension de fonctionnement de 5,5 V, pour des valeurs allant de 0,1 F à 3,3 F.

Nous avons opté pour la photopile 07/048/016 car elle fournit une tension en circuit ouvert de 5 V à 1 000 lux.

La valeur standard de I_{cc} à 1 000 lux de 50 µA est bien définie (*cf.* page 94). La connaissance de cette valeur nous permet de calibrer la résistance de charge pour obtenir une tension mesurable au voltmètre.

Nous nous intéresserons dans un premier temps au circuit de mesure, puis au dimensionnement du condensateur de stockage.

Circuit de mesure

Nous avons divisé les 4 décades de mesures, 10 à 100 000 lux, en deux gammes. Ce choix est fixé par la nécessité de maintenir une tension de fonctionnement faible aux bornes de la résistance de mesure.

En effet, la précision de la mesure est obtenue au voisinage du I_{cc}, c'est-à-dire pour $U = 0$. La photopile débite dans la résistance de mesure un courant linéaire en fonction de l'éclairement, et il est admis que pour maintenir une bonne précision, la tension résultante aux bornes de la résistance de mesure doit rester inférieure à 0,1 V par cellule, soit 0,7 V dans le cas présent, puisque la photopile comporte 7 bandes en série.

Le choix de deux gammes permet de limiter la tension aux bornes de la photopile à 200 mV et de garantir ainsi la précision demandée. Le changement s'effectue automatiquement lorsque l'éclairement atteint la valeur de 20 000 lux. Le changement de

gamme est signalé par le clignotement de la LED L2. Nous obtenons pour les deux gammes les valeurs suivantes :

- Gamme 1 : de 10 à 20 000 lux, la lecture au voltmètre étant 1 mV pour 10 lux.

  Il faut multiplier par 10 la valeur lue au voltmètre exprimée en millivolts (1 à 2 000 mV) pour obtenir la valeur correspondante en lux.

- Gamme 2 : de 1 000 à 100 000 lux, la lecture au voltmètre étant 1 mV pour 100 lux.

  Il faut multiplier par 100 la valeur lue au voltmètre exprimée en millivolts (1 à 1 000 mV) pour obtenir la valeur correspondante en lux.

Le schéma du circuit de mesure est présenté sur la **figure 7.10**.

Le circuit comprend deux amplis opérationnels équipant le même boîtier.

A_1 est monté en amplificateur, la contre-réaction étant appliquée sur l'entrée non inverseur (–). Il reçoit, sur son entrée notée (+), la tension de mesure à amplifier. Le gain positif de l'amplification est fixé par les résistances R_1 et R_2 par la relation connue :

$$G = 1 + R_2/R_1$$

soit $G = 10$, avec les valeurs spécifiées dans la nomenclature.

A_2 fonctionne en comparateur à hystérésis, la contre-réaction étant effectuée sur l'entrée positive, la tension de sortie commute de la valeur nulle à + 2 V lorsque la tension de A_1 atteint la valeur du seuil de basculement.

L'hystérésis est fixée par les résistances R_3 et R_4, le seuil de basculement est créé par la tension de référence. Celle-ci est obtenue par le pont diviseur, composé de R_5 et R_6, connecté au régulateur 3 V.

Les valeurs des résistances R_3, R_4, R_5 et R_6 sont déterminées de façon à obtenir le cycle d'hystérésis décrit sur la **figure 7.11**.

Le changement de gamme automatique (signalé par le clignotement de la LED L1) intervient lorsque U_e atteint 2 V (20 000 lux), la sortie de l'amplificateur A_2 monte à 3 V, ce qui enclenche la saturation du transistor T_1 et place en parallèle les deux résistances R_{c1} et R_{c2}.

R_{c2} est déterminée de façon à obtenir, comme nouvelle valeur de résistance de charge de la photopile, une valeur dix fois plus faible.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

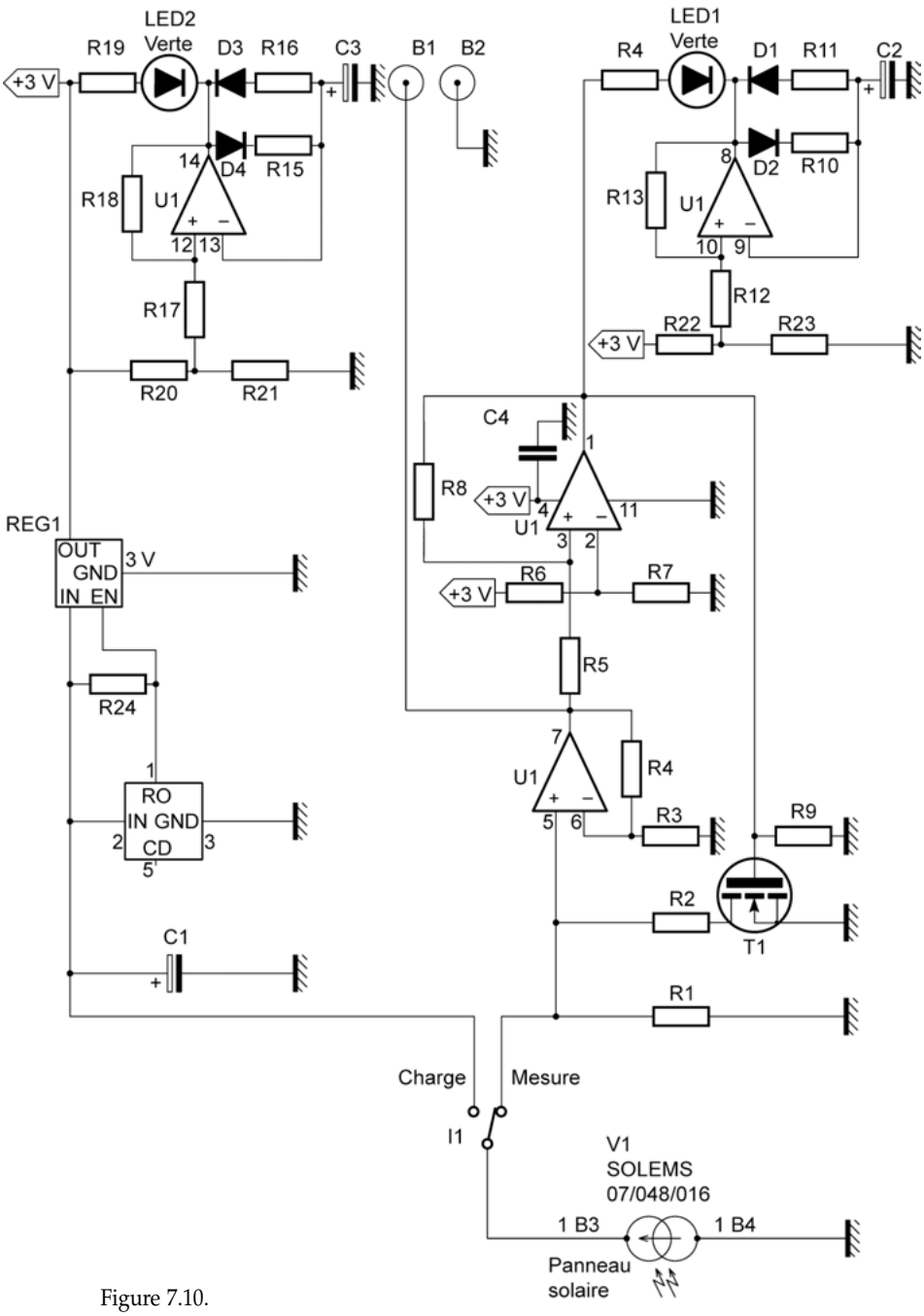


Figure 7.10.
Schéma du luxmètre (voir les valeurs des composants pages 104 et 107).

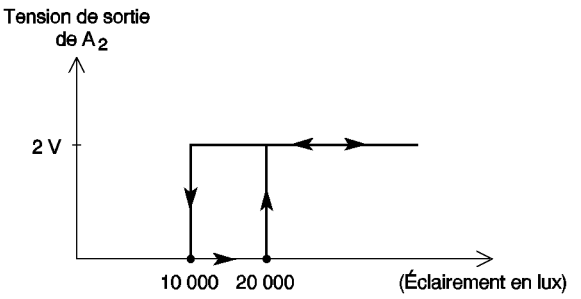


Figure 7.11.
Hystérésis du changement de calibre.

Cette nouvelle valeur de résistance de charge entraîne la modification de la tension de sortie, de 2 000 mV à 200 mV. La conversion des volts en lux sera obtenue en multipliant par 100 au lieu de 10 la valeur lue sur le voltmètre.

Le montage basculera de nouveau en gamme 1, lorsque l'éclairement diminuera pour atteindre la valeur de 10 000 lux, l'hystérésis garantissant des transitions franches.

Les résistances du montage sont déterminées en tenant compte du courant de calibration de 50 µA à 1 000 lux.

Circuit d'alimentation

De la consommation du montage et de la quantité d'énergie stockée, nous pouvons déduire le temps d'utilisation en mode mesure.

Avec les éléments du montage (résistances utilisées, ampli opérationnels faible consommation, régulateur 3 V également de faible consommation), la consommation mesurée est de l'ordre de 20 à 25 µA.

En considérant une chute de tension de 0,15 V (fonctionnement entre 3,15 et 3 V), l'expression suivante nous permet de déterminer la durée de fonctionnement minimale :

$$CV = IT$$

d'où :

$$T = \frac{CV}{I}$$

T est l'autonomie en secondes, I la consommation maximale du montage et V la chute de tension du condensateur. (Voir « En savoir plus » à la section 4.3 sur les supercondensateurs.)

Pour $U = 25\,\mu A$, $V = 0{,}15$ V et $C = 0{,}47$ F, nous obtenons une durée de 45 minutes.

L'autonomie minimale de l'appareil pour une chute de tension de 0,15 V, permet donc l'utilisation du montage en mode mesure pendant 45 minutes.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

En maintenant le luxmètre dans un endroit bien éclairé, proche d'une fenêtre par exemple, le condensateur va acquérir la tension de U_{co}, soit 5 V. L'autonomie sera dans ce cas de 10 heures, car la chute de tension du condensateur est de 2 V.

Cette même formule permet de calculer le temps de récupération pour emmagasiner de nouveau 1 V. Pour une photopile qui délivre 500 µA (sous 10 000 lux), nous obtenons :

$$T = 0{,}47/500\ \mu A = 940\ s,\ \text{soit environ } 1/4\ \text{d'heure}$$

Si la charge a lieu à plus faible éclairement, le temps de recharge sera prolongé d'autant (par exemple 1/2 heure à 5 000 lux et 2 h 30 à 1 000 lux).

Et la protection de charge ?

Le condensateur de forte valeur que nous utilisons a une tension nominale de 5,5 V, ce qui signifie que la photopile peut être utilisée entre 0 et 5,5 V. Au-delà, il est nécessaire de limiter la tension qu'elle reçoit car elle craint la surcharge. Le constructeur recommande de ne pas dépasser 6,3 V (seuil de surcharge).

Mais comme notre photopile a une tension de circuit ouvert maximale (en plein soleil) de 6 V (= 7 bandes × 0,85 V), il est inutile de prévoir une protection surcharge.

Quant à la décharge, elle n'endommage en rien le montage, il suffit de procéder à une recharge pour remettre le circuit de mesure en service.

Réalisation pratique

Le tracé imprimé et l'implantation des composants du luxmètre sont présentés sur les **figures 7.12** et **7.13**.

Liste des composants

Divers

B_1 : borne noire
B_2 : borne rouge
I_1 : INTER SPDT On-On Série T HOR, T101MH9ABE

Condensateurs

C_1 : 0F47-5-R-NF COND. SUPER CAPA 0,47 F/5,5 V Série NF
C_2 : 1M-63-R COND. CHIM. RAD. 1 µF/63 V
C_3 : 1M-63-R
C_4 : MKT-33N-63-E5 COND. PLAST. 10 % 33 nF/63 V

Résistances

R_{14} : MR25-1K RES. C. METAL. 1 % 50PPM 1K
R_{19} : MR25-1K
R_6 : MR25-1M RES. C. METAL. 1 % 50PPM 1M
R_8 : MR25-1M
R_{12} : MR25-1M
R_{13} : MR25-1M
R_{17} : MR25-1M
R_{18} : MR25-1M
R_{20} : MR25-1M
R_{21} : MR25-1M
R_{22} : MR25-1M
R_{23} : MR25-1M
R_4 : MR25-1M8 RES. C. METAL. 1 % 50PPM 1M8
R_1 : MR25-200 RES. C. METAL. 1 % 50PPM 200R
R_3 : MR25-200K RES. C. METAL. 1 % 50PPM 200K
R_2 : MR25-22 RES. C. METAL. 1 % 50PPM 22R

(suite page 107)

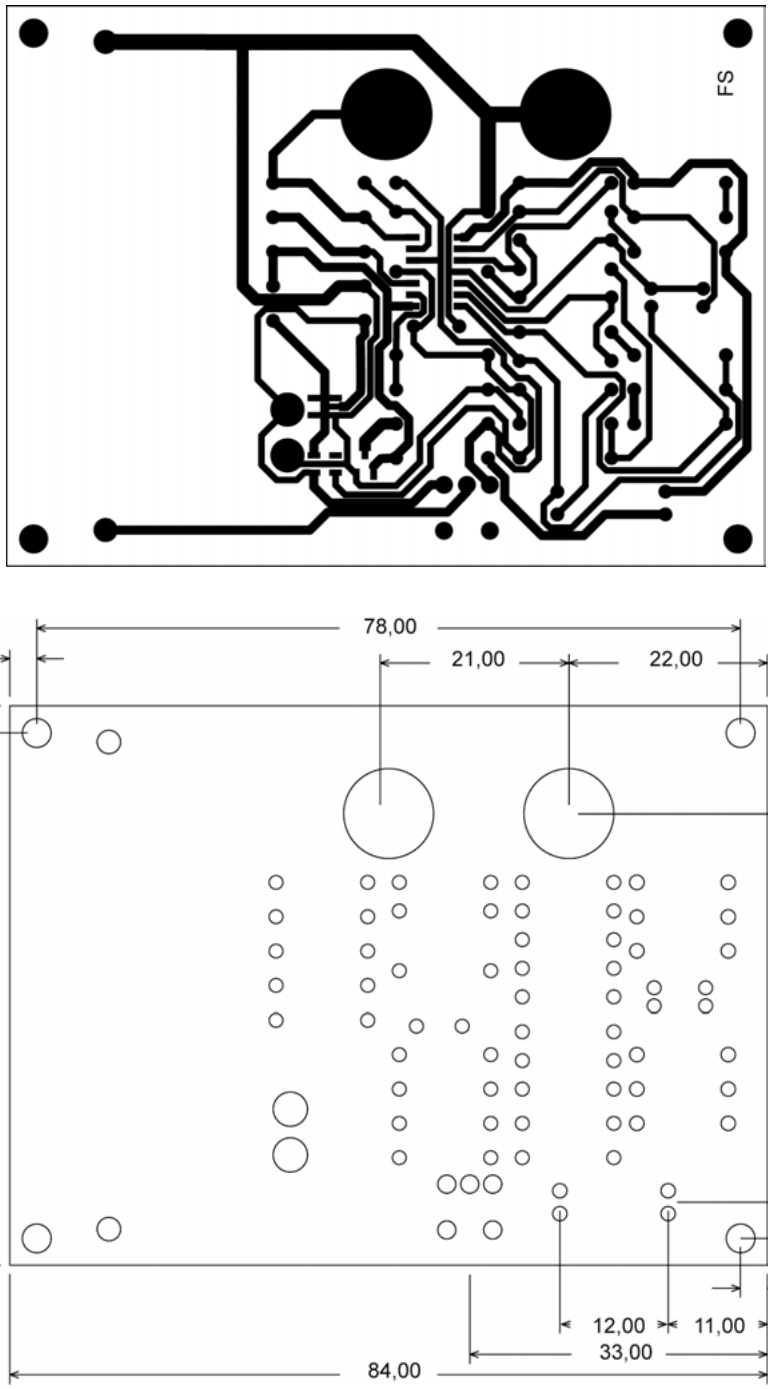


Figure 7.12.
Plan des pistes du circuit imprimé et plan de perçage du circuit.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

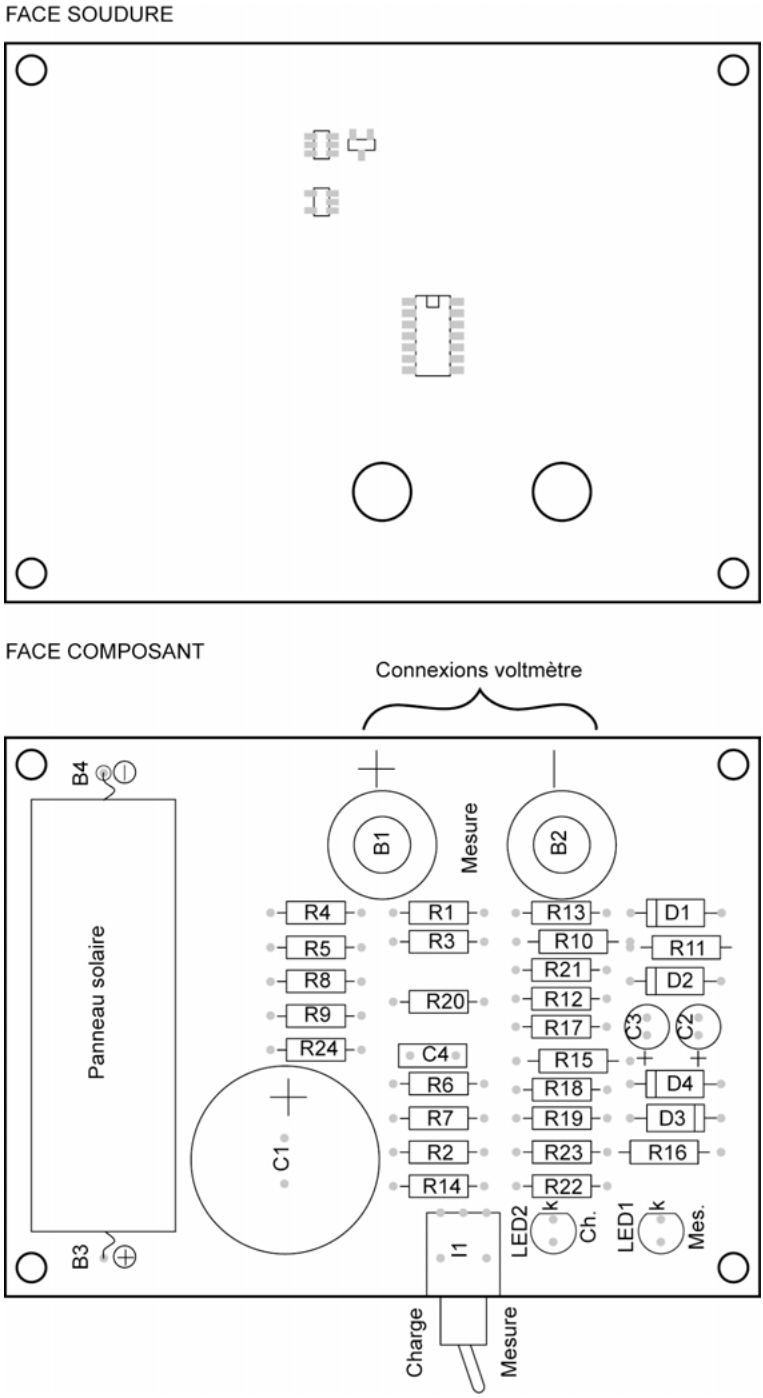


Figure 7.13. **Implantation des composants du luxmètre.**

Suite de la liste des composants

Résistances

R_{11} : MR25-22K RES. C. METAL. 1 % 50PPM 22K
R_{16} : MR25-22K
R_{10} : MR25-2M2 RES. C. METAL. 1 % 50PPM 2M2
R_{15} : MR25-2M2
R_{24} : MR25-470K RES. C. METAL. 1 % 50PPM 470K
R_9 : MR25-4K7 RES. C. METAL. 1 % 50PPM 4K7
R_7 : MR25-570K RES. C. METAL. 1 % 50PPM 570K
R_5 : MR25-826K RES. C. METAL. 1 % 50PPM 826K

Semi-conducteurs

REG_1 : NCP551SN30T1G SOT23-5-REG. 3 V 150 mA/–40+85
T_1 : FDN335N SOT3-TRANSISTOR N MOS 20 V 1,7 A/–55+150
U_1 : MCP6044ISL SO14-AMPLI OP QUAD 600 nA R TO R i/o/–40+85
U_2 : NCP303LSN30T1G SOT23-5-SUPERVI ALIM. 3 V 2 %/–40+125
D_1 : BAT49-4P DO15-DIODE SCHOTTKY 80 V/0,5 A
D_2 : BAT49-4P
D_3 : BAT49-4P
D_4 : BAT49-4P
LED1 : TLHG4400 LED 3 verte
LED2 : TLHG4400 LED 3 verte

Mode d'emploi et conseils

Pour la charge, on placera le montage sous une source de lumière ou en plein air à l'emplacement le plus lumineux, sans oublier de placer l'interrupteur en position « Charge ».

Le montage est prêt à passer en mesure dès le clignotement de la LED L2, la tension aux bornes de la photopile est supérieure à 3,15 V, le condensateur est suffisamment chargé pour passer à la mesure. Rappelons que l'on a 45 minutes d'autonomie entre 3,15 et 3 V.

Pour la mesure, câbler le voltmètre sur les fiches bananes femelles (sur un calibre 2 V) et placer l'interrupteur du montage sur « Mesure ».

Placer ensuite le montage à l'emplacement où l'on souhaite mesurer l'éclairement.

La photopile doit être éclairée uniformément pour que le courant généré soit le même dans toutes ses bandes (les 7 cellules intégrées en série).

Par ailleurs, sa sensibilité est telle que tout ombrage ou variation, aussi faible soit-il, de l'éclairement sera perceptible à la mesure. On veillera donc à ne pas faire de l'ombre au capteur lors des mesures, par un mouvement de personne, de mains… à proximité. Le mieux est de s'éloigner, quitte à prendre de longs fils de raccordement au voltmètre !

Le changement de calibre est automatique, le passage du calibre 1 au calibre 2 est signalé par le clignotement de la LED L1. Une vérification du fonctionnement du changement de calibre consiste à masquer complètement la photopile avec les mains, cette action

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

induit l'arrêt du clignotement indiquant que le luxmètre est repassé sur le calibre 1.

7.4 LIAISON SANS FIL ALIMENTÉE PAR PHOTOPILES

Ce montage permet de réaliser une télécommande RF. Il est composé de deux circuits indépendants : d'une part un émetteur autonome alimenté par photopiles, et d'autre part un récepteur alimenté sur le secteur. Ce récepteur comporte un relais pour la mise en marche d'un appareil tel que : sonnette, motorisation de portail, etc. Ce choix est laissé à l'appréciation de l'utilisateur (nous ne décrivons que le dispositif de commande).

La partie émetteur d'une liaison sans fil s'adapte bien à une alimentation solaire : en effet, la consommation de l'émetteur est nulle en l'absence de messages à envoyer, de plus les ordres à transmettre nécessitent un temps d'activation bref pour être compris du récepteur. Ce mode de fonctionnement est réalisé par pression sur un bouton poussoir, qui connecte pour un temps court une source d'alimentation à l'émetteur pourvu de son encodeur.

Le code envoyé par les ondes sera perçu par l'antenne du montage récepteur afin de mettre en fonction le matériel à télécommander.

Le « non-fonctionnement » d'une télécommande pour cause de pile usagée est une sensation désagréable que nous avons tous eue à subir… L'utilisation d'une photopile solaire chargeant un condensateur de stockage permettra de ne jamais être en panne d'alimentation. Si le condensateur est déchargé, il suffit de placer quelques instants la photopile sous une lampe ou à proximité d'un endroit très éclairé pour le recharger.

Circuit émetteur

Description

Nous avons retenu un module hybride de chez AUREL. Ce composant admet une tension d'utilisation de 3 V à 12 V, la consommation évolue de 5 mA à 12 mA pour une puissance délivrée de 1 à 2 mW. Cette puissance est suffisante pour obtenir une portée de 15 à 20 m en intérieur, et jusqu'à 100 m ou plus en extérieur.

La **figure 7.14** propose le schéma électronique de l'émetteur.

La partie émission est constituée d'un circuit couche hybride comprenant une partie oscillateur à onde de surface, oscillant à la fréquence de 433,92 MHz. Cette fréquence est celle attribuée pour les communications radios en bande libre sans licence. Elle

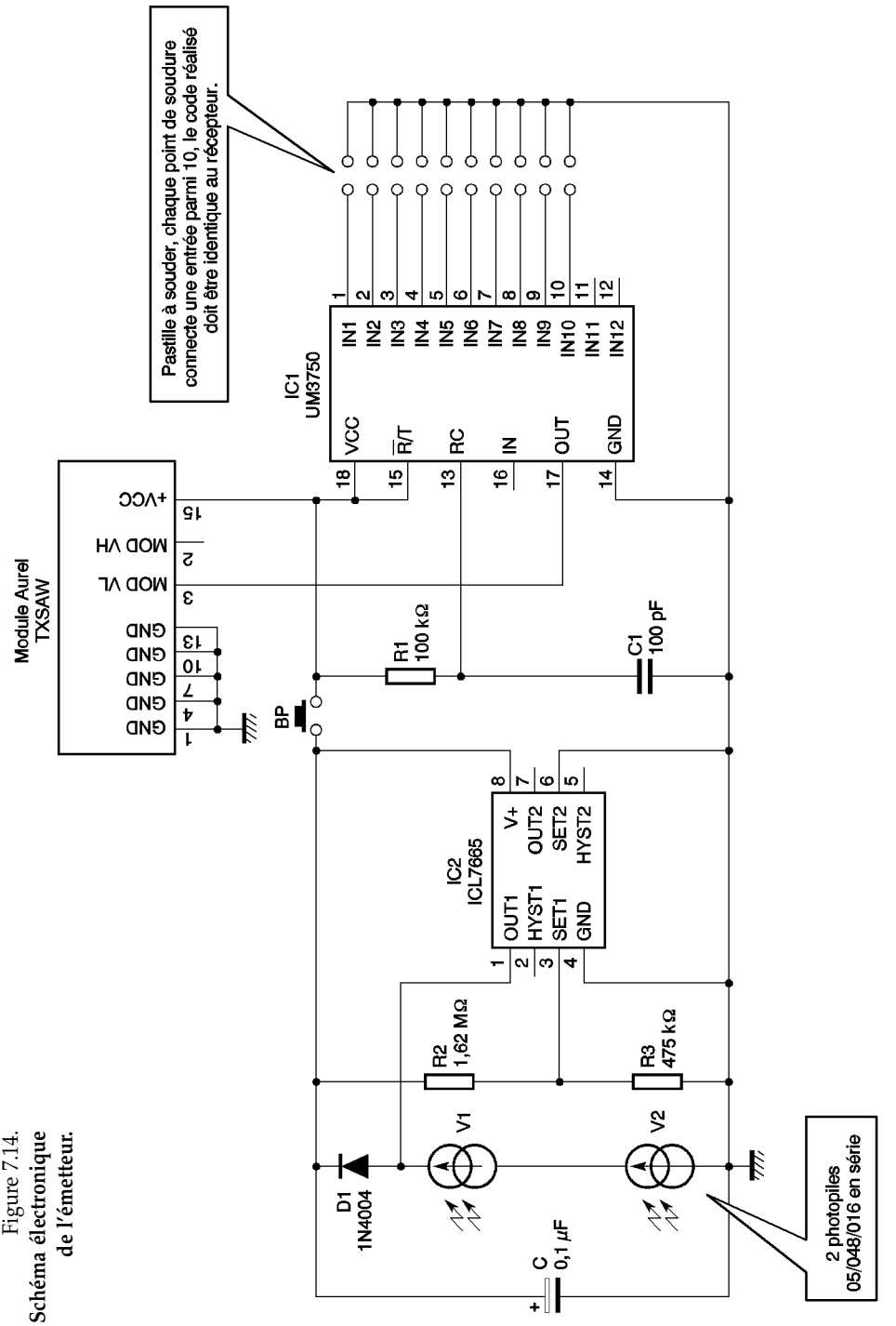


Figure 7.14.
Schéma électronique de l'émetteur.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

relève de la norme ETS 300-220 qui fixe le gabarit d'émission : entre autres, la puissance rayonnée doit être inférieure à 10 mW.

La seconde partie comprend les étages d'adaptation et d'amplification qui délivrent sur l'antenne intégrée le code modulé en fréquence. L'intégration complète du circuit émetteur permet une utilisation simple, aucun réglage n'est à effectuer.

Pour éviter les déclenchements intempestifs en réception, causés par les téléphones portables, des télécommandes radios diverses (clef de voiture, porte de garage, etc.) qui encombrent fortement le spectre, il est important d'utiliser un circuit de codage. L'ordre émis sera reconnu par le récepteur grâce à ce code et uniquement pour ce code.

Le circuit d'encodage/décodage est réalisé par le circuit intégré UM 3750. Son mode de fonctionnement est déterminé par la broche 15 : pour l'encodage, il faut relier cette broche au + V_{DD} et dans le montage réalisant la réception, elle sera connectée à la masse pour effectuer de manière symétrique le décodage.

Important : le code est fixé en soudant au choix à la masse certaines des broches 1 à 10. Les mêmes soudures sont à dupliquer sur le circuit de réception pour reconnaître le code émis.

La sortie du code s'obtient sur la broche 17 : c'est le signal basse fréquence à moduler. La fréquence de modulation est déterminée par le choix d'un réseau RC à connecter sur la broche 13.

De la même façon, ces valeurs de RC sont à reproduire sur la broche 13 du circuit de décodage en réception.

Alimentation de l'émetteur

L'alimentation par condensateur s'articule autour d'un circuit de protection, le ICL 7665, dénommé *under/over voltage detector.*

La fonction *over voltage* sert de régulation de surcharge (voir section 4.4). Elle permet, par l'ajustement de 2 résistances, connectées sur l'entrée Vset1, de faire commuter la sortie OUT1, lorsque la tension d'alimentation dépasse un seuil donné.

Nous profiterons de la mise en saturation du transistor interne disponible sur OUT1 pour court-circuiter la photopile lorsque la tension d'alimentation fournie par le condensateur de stockage atteint la tension de 5,5 V ; le courant fourni par la photopile sera dérivé par ce transistor.

Cette sortie permet d'absorber un courant maximum de 20 mA ; on prendra soin de dimensionner les cellules pour que leur courant de court-circuit en plein soleil ne dépasse pas cette valeur.

Pour des courants plus élevés, l'emploi d'un transistor externe plus puissant sera nécessaire.

Le basculement a lieu lorsque la tension en Vset1 atteint 1,3 V. Les résistances R_2 et R_3 sont calculées pour obtenir cette tension lorsque la tension d'alimentation approche la tension nominale du condensateur, à savoir 5,5 V, grâce à la relation suivante :

$$1{,}3\ \text{V} = 5{,}5\ \text{V} \times \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

À l'inverse, lorsque la tension Vset1 est inférieure à 1,3 V, la sortie OUT1 demeure en haute impédance, le panneau alimente le condensateur.

Nous n'utiliserons pas la fonction *under voltage* (protection seuil bas) disponible sur la sortie OUT2, car le condensateur ne craint pas la décharge profonde. Mais le mode de fonctionnement serait le même : le seuil bas se fixe par la mise en place d'un pont de résistances à connecter sur l'entrée Vset2.

La **figure 7.15** présente le principe de montage d'un ICL 7655 en protection surcharge.

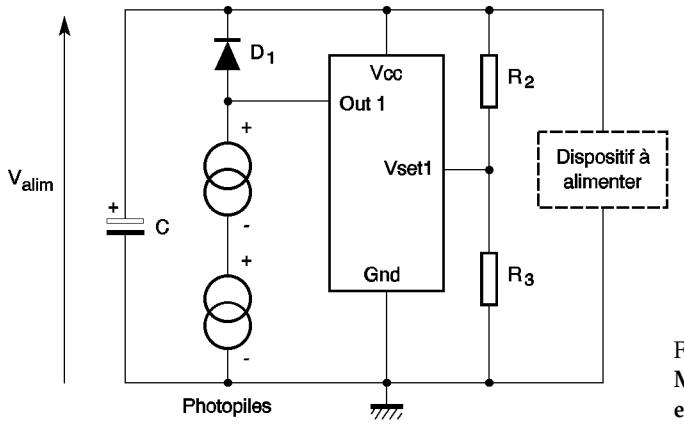


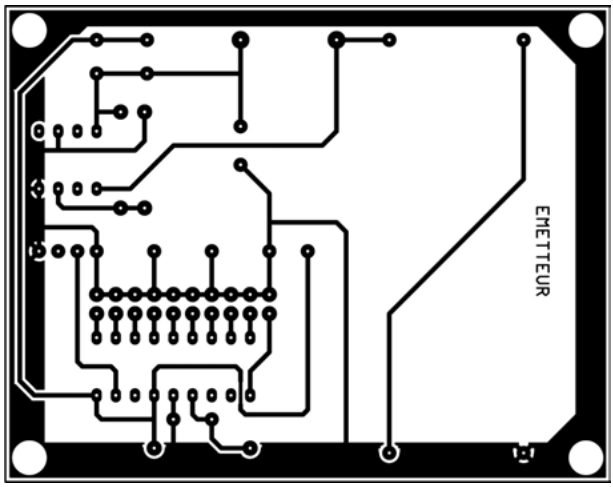
Figure 7.15.
Montage d'un ICL 7655 en protection surcharge.

La diode D_1 sert d'anti-retour : elle empêche le condensateur de se décharger à travers le transistor OUT1.

Réalisation pratique de l'émetteur

Le tracé imprimé et l'implantation des composants de l'émetteur sont présentés sur les **figures 7.16** et **7.17**.

Figure 7.16.
Tracé du circuit imprimé.



Liste des composants
Résistances
R_1 : 100 kΩ, 5 %, 1/4 W
R_2 : 1,62 MΩ, 1 %, 1/4 W
R_3 : 475 kΩ, 1 %, 1/4 W
Condensateurs
C : 0,1 F, 5,5 V, Panasonic
C_1 : 100 pF, céramique
Semi-conducteurs
Émetteur radio :
TX SAW, AUREL boîtier SIL 15 broches
IC1, UM 3750 : décodeur/encodeur, UMC boîtier DIL 18 broches
IC2, ICL 7665 : superviseur d'alimentation, Intersil ou Maxim, boîtier DIL 8 broches
2 photopiles : 05/048/016, Solems
Diode D_1 : 1N 4004
Divers
1 bouton poussoir
4 fils de câblage
pour les photopiles

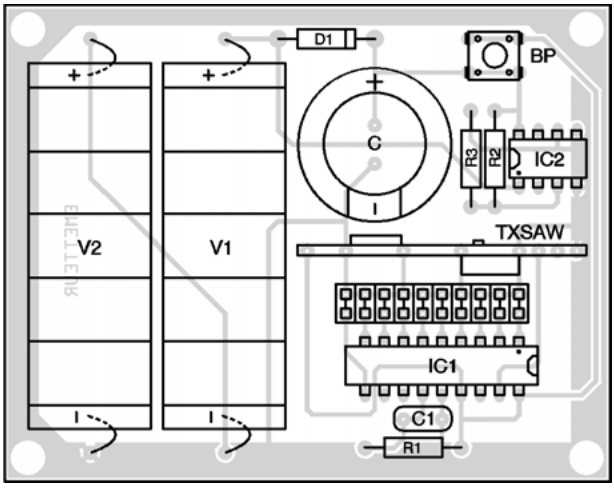


Figure 7.17.
Implantation des composants.

Circuit récepteur

Description

Le récepteur est conçu de façon symétrique à l'émetteur. Un circuit hybride AUREL constitue le circuit récepteur proprement dit, il est suivi du décodeur UM 3750. Ce dernier fournira un créneau de tension sur la sortie en broche 17, si le code démodulé correspond à celui attendu. Vérifier la conformité des soudures des pins 1 à 10 en cas de non-déclenchement du relais.

L'antenne de réception sera branchée au plus près de la sortie du CI. Le circuit récepteur sera soudé sur un PCB possédant un plan de masse ; ce point est important afin d'établir le contrepoids d'antenne garantissant une portée optimale.

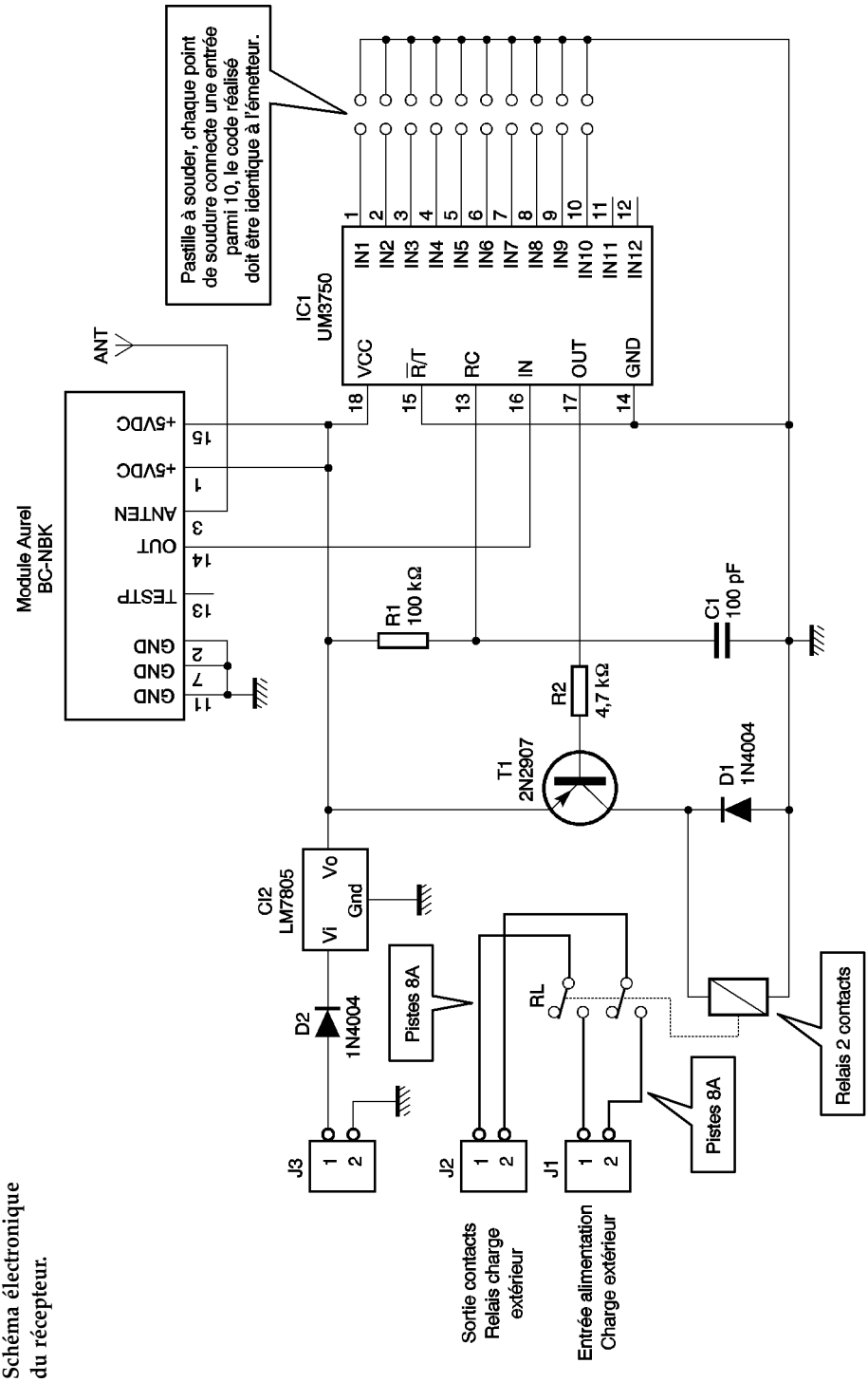


Figure 7.18.
Schéma électronique du récepteur.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

L'antenne sera constituée d'un simple brin de fil de longueur égale à 1/4 de longueur d'onde, soit 17 cm pour une réception à 433,92 MHz.

Le bornier J_3 est l'entrée alimentation du récepteur, celle-ci doit être une tension continue comprise entre 6 et 24 V, régulée ou non, fournie par un adaptateur secteur 220 V/DCV par exemple.

Sur le bornier à vis J_1, on branchera le dispositif à télécommander, son alimentation extérieure étant connectée sur J_2.

Le schéma électronique du récepteur est présenté sur la **figure 7.18** (page précédente).

Réalisation pratique du récepteur

Le tracé du circuit imprimé et l'implantation des composants du récepteur sont présentés sur les **figures 7.19** et **7.20**.

Figure 7.19. **Tracé du circuit imprimé.**

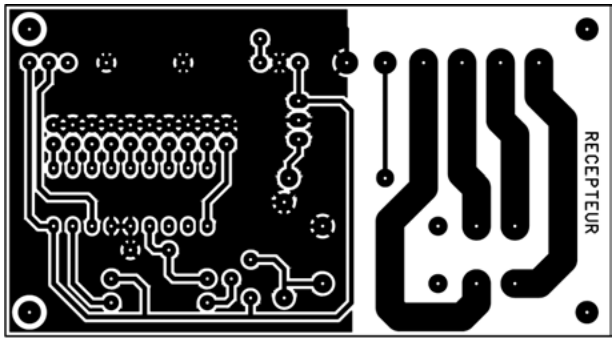
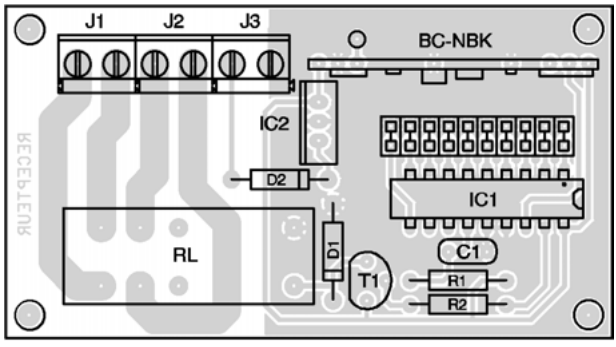


Figure 7.20. **Implantation des composants.**



Liste des composants

Résistances

R_1 : 100 kΩ, 5 %, 1/4 W

R_2 : 4,7 kΩ, 5 %, 1/4 W

Condensateur

C_1 : 100 pF, céramique

Semi-conducteurs

Récepteur radio : réf BC-NBK, AUREL boîtier SIL 15 broches

IC_1, UM 3750 : décodeur/encodeur, UMC boîtier DIL 18 broches

D_1, D_2 : diode 1N 4004

IC_2, 7805 : régulateur de tension 5 V, 7805

T_1 : 2N 2907

Connectique

J_1, J_2, J_3 : bornier à vis 2 contacts, pas de 5,08, MKDS 1.5/2 – 5,08 Phoenix contact

Divers

Antenne : fil de cuivre rigide de 17 cm

Relais : bobine 5 V, 2 contacts T, Tyco Electronics, RT 444005

8 ALIMENTATIONS PAR PANNEAUX SOLAIRES

Les alimentations que nous présentons dans ce chapitre utilisent des panneaux solaires (ou modules photovoltaïques) plus puissants que les photopiles, ce qui permet d'alimenter des récepteurs plus « gourmands » comme les éclairages et les moteurs.

8.1 ÉCLAIRAGE D'UN PAS DE PORTE AVEC DÉTECTION DE PRÉSENCE

Sur les principes évoqués à la section 5.3 (s'y référer pour comprendre les formules appliquées ici), nous allons décrire la mise en place d'un éclairage de pas de porte que l'on peut installer devant une maison individuelle, une allée, un passage…

L'idée part du constat suivant : il est intéressant de disposer d'un éclairage devant chez soi, qui s'allume automatiquement quand une personne s'y présente. On pourra voir clair pour sonner ou sortir ses clés pour ouvrir la porte. Mais l'alimentation secteur suppose de percer son mur de façade et d'installer un interrupteur extérieur à la portée du premier venu.

On évitera ces désagréments grâce au système suivant, automatique, autonome et économe en énergie :

- éclairage basse consommation ;
- panneau solaire ;
- batterie ;
- régulateur ;
- détecteur crépusculaire et détecteur de mouvement dans le même boîtier.

Ainsi, pas d'interrupteur, pas de fils à passer au travers du mur, et un fonctionnement limité dans le temps (on ne risque pas d'oublier de l'éteindre).

Cahier des charges typique

Dans un premier temps, nous considérons une installation en France, puis nous la déplacerons dans un pays d'Afrique et verrons ce que le système peut fournir comme durée d'éclairage.

- Éclairage fluo de l'ordre de 10 W.
- Besoin dans le temps : 10 passages par 24 h, à raison de 2 min chacun (ou 20 passages de 1 min), soit 20 min d'allumage par jour.
- Lieux d'implantation :
  1. France, région parisienne – sur façade Sud dégagée –, orientation à 60° par rapport à l'horizontale envisageable.
  2. Mali – sur toiture orientée Sud bien dégagée –, à 30° d'inclinaison.

Choix des composants et consommation électrique

- Détecteur 12 V (ce composant est distribué notamment par la société Solar Energy Systems (83)) intégrant :
  – la détection crépusculaire (cellule jour/nuit qui arrête le système le jour) ;
  – la détection de mouvement.

  Consommation permanente :
  8 mA/12 V, soit 8 × 24 = 192 mAh/jour.
- Réglette fluo-compacte étanche 11 W-12 V.

  Consommation sur 24 h :
  917 mA × 20 min/60 = 305,7 mAh/jour.

Consommation totale de nos deux récepteurs : 192 + 305,7 = 497,7, arrondis à 500 mAh/jour.

EN SAVOIR PLUS

La détection de mouvement

Un détecteur de mouvement utilise une cellule infrarouge sensible aux modifications thermiques (l'infrarouge lointain de quelques microns de longueur d'onde correspond à des ondes thermiques). Une source de chaleur en déplacement, donc les mouvements d'une personne sont détectés, ce qui permet d'activer un relais pour piloter un appareil.

Dimensionnement panneau (sur Paris)

$$P_c = \frac{0{,}5\ \text{Ah} \times 12\ \text{V}}{1{,}12\ \text{h} \times 0{,}6} = 8{,}9\ \text{W}_c$$

Avec un panneau 10 W_c, on pourra en théorie récupérer une énergie consommable supérieure à 0,5 Ah :

$$E = \frac{10\ \text{W} \times 1{,}12\ \text{h} \times 0{,}6}{12\ \text{V}} = 0{,}56\ \text{Ah}$$

On obtient donc 24 min d'éclairage au lieu de 20.

Capacité batterie

L'emploi du système sur Paris requiert 10 jours d'autonomie sans apport solaire (minimum une semaine) :

$$C = \frac{0{,}5\ \text{Ah} \times 10\ \text{jours}}{0{,}6} = 8{,}33\ \text{Ah}$$

Une batterie de 8 à 10 Ah fera l'affaire, à condition qu'à la température la plus basse, mettons – 5 °C, elle garde encore 60 % de sa capacité.

Dans les autres régions de France, on pourra moduler ce chiffre de 10 jours. Si, sur le site d'installation, il ne se passe pas plus de 5 jours consécutifs de temps couvert, on pourra se baser sur 5 jours d'autonomie sans apport solaire et choisir une batterie 5 ou 6 Ah.

Régulation de charge

Si l'estimation de la durée journalière de 20 min est juste ou surestimée, il n'y aura pas de décharge profonde de la batterie, on se contentera alors d'un limiteur de surcharge d'une valeur de 1 A minimum, en 12 V, puisque que le panneau débitera au maximum ≈ 10 W/12 V = 850 mA.

Sinon, on pourra prendre un régulateur charge/décharge (entrée et sortie > 1 A), au risque de voir l'utilisation interrompue en cas de dépassement des consommations prévues (voir section 4.4).

Système au Mali

Calculons maintenant ce que ce simple éclairage autonome peut rendre comme service dans un pays plus ensoleillé comme le Mali.

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Pour simplifier et réduire le coût, nous retirons le détecteur de présence et plaçons un simple interrupteur que l'utilisateur pourra actionner à volonté afin d'éclairer le devant de sa maison.

La consommation est donc réduite à l'éclairage seul, de puissance 11 W, sous une tension de 12 V.

Le panneau de 10 W_c placé vers le Sud et incliné à 30° produira, dans ces conditions :

$$10\ W_c \times 3\ h \times 0{,}8 = 24\ Wh\ par\ jour$$

typiquement, pour une énergie solaire disponible de 3 kWh/jour, valeur minimale au Mali.

Donc l'éclairage de 11 W pourra fonctionner pendant :

$$24\ Wh / 11\ W = 2{,}2\ h$$

soit un peu plus de 2 heures par jour, ce qui est nettement mieux qu'à Paris.

On constate ainsi tout l'intérêt du photovoltaïque dans un pays bien ensoleillé.

Quant à la batterie, avec 10 Ah, on dispose d'une autonomie de :

$$10\ Ah \times 0{,}8 \times 12\ V / 11\ W = 8{,}7\ h$$

Cela correspond à 4 jours de fonctionnement (2 h/jour), sans apport solaire. Cela permet à l'utilisateur d'utiliser son éclairage même après quelques jours de temps couvert. C'est généralement suffisant dans les pays ensoleillés, sauf éventuellement pendant la saison des pluies ou la mousson si le temps est couvert pendant plus de 5-6 jours consécutifs.

Installation physique

Le panneau sera orienté vers le Sud, dans la mesure du possible (voir le calcul ci-dessus). Pour une autre orientation, mettre un panneau de puissance double à l'Est et à l'Ouest, mais éviter l'orientation Nord, trop défavorable.

Le plus simple est probablement de monter le panneau sur un auvent ou directement sur le toit. On peut aussi monter un poteau sur lequel on mettra la lampe, le détecteur de présence et un petit boîtier pour la batterie et le régulateur.

Placer la batterie à l'abri de la pluie, sous l'auvent ou dans un boîtier, mais jamais dans un coffret étanche à l'air (une batterie doit toujours « respirer »). Le régulateur pouvant être choisi étanche, il sera facile à poser, au mur ou dans un coffret.

Quant au détecteur, il sera placé là où la visibilité est la meilleure pour les personnes qui arrivent et réglé en conséquence pour adapter sa portée.

Câblage électrique

La **figure 8.1** donne un synoptique de l'installation complète (cas 1 : avec limiteur de surcharge uniquement, cas 2 : avec régulateur charge/décharge).

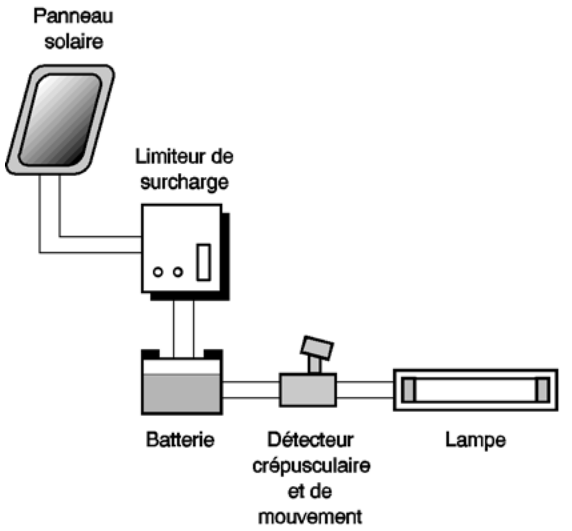


Figure 8.1. **Synoptique de l'installation de l'éclairage automatique.**

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

Un régulateur charge/décharge se trouve à l'intersection du panneau solaire, de la batterie et de l'utilisation, alors qu'un limiteur de surcharge se situe entre le panneau solaire et la batterie.

La lampe, elle, fonctionnera en « esclave » du détecteur qui relayera l'une des polarités du 12 V. Se reporter à la notice du détecteur pour effectuer les branchements.

Si l'on supprime le détecteur de mouvement, le remplacer par un simple interrupteur câblé de la même manière.

Consignes importantes :

- Les sorties de câbles par presse-étoupe doivent toujours être orientées vers le bas (pour ne pas qu'il pleuve dedans !).
- Ne jamais court-circuiter les 2 bornes de la batterie.
- Idéalement, charger une fois la batterie avant sa mise en place (pendant 12 h à un courant de 1 A par exemple pour une 10 Ah).
- Le régulateur, quel qu'il soit, ne pourra fonctionner qu'une fois alimenté par la batterie, toujours la câbler en premier.
- Masquer le panneau solaire par un tissu opaque pendant son câblage pour qu'il ne débite pas (surtout s'il fait grand soleil !).
- Diamètres des câbles : tout câblage en continu répond à des règles pour que les diamètres de câble soient compatibles avec le courant qui y circule (un câble trop fin induit des chutes de tension). Le choix du diamètre dépend donc de l'ampérage et de la longueur. Dans le cas qui nous occupe, les courants sont tous ≤ 1 A, on pourra donc utiliser des câbles de section $2 \times 1{,}5$ mm^2 si leur longueur ne dépasse pas 10 m.

8.2 ALIMENTATION D'UN PORTAIL AUTOMATIQUE

Pour des raisons similaires à celles de l'éclairage du pas de porte, il peut s'avérer intéressant d'éviter de raccorder la motorisation d'un portail au réseau du pavillon (pour éviter d'enterrer des câbles). Une alimentation indépendante par panneau solaire est possible, vu que le moteur fonctionne peu. Si cette motorisation est munie d'un émetteur-récepteur (télécommande), il faudra néanmoins tenir compte de la consommation du récepteur. À la différence de notre montage « liaison RF », c'est le récepteur qu'il faudra alimenter, et ce dernier fonctionne en permanence puisqu'il doit rester « à l'écoute » de l'émetteur.

Beaucoup de systèmes de motorisation de portail existent sur le marché, donc le choix est vaste, et pour réaliser ce « portail solaire », il conviendra de prendre si possible :

- un moteur en courant continu (12 VDC de préférence) ;
- un récepteur de télécommande de consommation très réduite (également en 12 VDC).

On fera ensuite un bilan d'énergie et un calcul de l'alimentation nécessaire comme expliqué plus haut (voir section 5.3).

Exemple

Besoins :

- Moteur 10 A-12 V (120 W) fonctionnant 3×20 s par jour : consommation électrique 167 mAh/jour.
- Récepteur 40 mA permanent sous 12 V : consommation électrique 960 mAh/jour.
- Consommation globale : 1 127 mAh/jour.

Alimentation solaire :

- Panneau nécessaire sur Mâcon (en orientation Sud, en inclinaison 60° par rapport à l'horizontale) :

$$P_c = \frac{1{,}127 \times 12}{1{,}25 \times 0{,}6} = 18 \text{ W}_c \rightarrow \text{Panneau 18 ou 20 W}_c\text{-12 V}$$

- Batterie pour 10 jours d'autonomie sans apport solaire :

$$C = \frac{1{,}127 \times 10}{0{,}6} = 18{,}8 \text{ Ah} \rightarrow \text{Batterie 20 Ah-12 V}$$

Attention : vérifier que la batterie choisie pourra endurer le courant de pointe au démarrage du moteur.

- Régulateur : un boîtier charge/décharge de 15 A-12 V (même remarque que précédemment : le courant admissible en sortie du régulateur charge/décharge doit être supérieur ou égal au courant de démarrage du moteur, sauf si ce régulateur accepte les surintensités transitoires).

  On pourra toutefois se contenter d'un limiteur de surcharge si la consommation ne risque pas d'être excédentaire. On n'aura plus alors à se soucier de l'ampérage de démarrage que sur la batterie (voir les deux montages électriques de l'éclairage du pas de porte, section 8.1).

Remarque : si votre système ne peut fonctionner qu'en 220 V alternatifs, il faudra ajouter un convertisseur DC/AC entre la batterie et le moteur. Il faut le choisir compatible avec la puissance instantanée (120 W, c'est un convertisseur d'assez petite

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

taille). Il faut également tenir compte de son rendement dans le calcul de l'énergie nécessaire.

Sur notre exemple précédent, il faudra majorer la consommation en la divisant par le rendement du convertisseur. En supposant que ce rendement soit de 80 % :

Consommation sans conversion d'énergie :
1 127 mAh × 12 V = 13,5 Wh/jour

Consommation avec conversion d'énergie :
13,5/0,8 = 16,9 Wh/jour

Pour le montage de cette alimentation solaire de portail, se reporter aux conseils donnés à la fin de la section 8.1, qui s'appliquent à toute alimentation solaire.

BIBLIOGRAPHIE

Anne LABOURET et Michel VILLOZ – *Énergie solaire photovoltaïque*. Dunod, 4e édition, 2009.

Alain CHÉRON DE LA CASINIÈRE – *Le Rayonnement solaire dans l'environnement terrestre*. Publibook, 2003.

W. PALZ – *Atlas Européen du Rayonnement Solaire*. Verlag TÜV Rheinland, 1984 (une base de données contenant des statistiques du rayonnement solaire en de nombreux sites européens).

Christian VAUGE et Marc BELLANGER – *L'Aube des énergies solaires*. Hachette, 1984 (de la pédagogie du soleil et des premières photopiles : un retour aux sources de l'énergie solaire).

Alain RICAUD – *Photopiles solaires*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Suisse), Collection « Cahiers de Chimie », 1997 (De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés).

GREEN, MARTIN A., ENGLEWOOD Cliffs – *Solar Cells: Opera-ting Principles, Technology and System Applications*. N.J.; Sydney: Prentice Hall, 1992 (La bible anglo-saxonne des physiciens du solaire).

Revue *Systèmes Solaires, Journal des Énergies Renouvelables* – http://www.energies-renouvelables.org/accueil_systemes_solaires.asp

Le baromètre photovoltaïque européen. OBSERV'ER, 2009 – http://www.energies-renouvelables.org/observer/stat_baro/observ/baro190.pdf

Annuaire des fabricants et fournisseurs de l'industrie photovoltaïque (française), 2010 – http://www.enr.fr/docs/2010140822_annuaireindustriePV2010.pdf

ADRESSES UTILES

CIDFER (Centre d'Information de Documentation et de Formation sur les Énergies Renouvelables)
146 rue de l'Université
75007 Paris
observer@energies-renouvelables.org
Horaires et informations sur :
http://www.energies-renouvelables.org/centre-ressources.asp

À la même adresse, la FONDEM (Fondation Énergies pour le Monde) et la revue *Systèmes Solaires.*

ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)
Centres à Angers (49), Paris (75), Sophia-Antipolis (06) et Bruxelles (Belgique) et de nombreuses agences régionales
www.ademe.fr

ARENE (Agence Régionale de L'Environnement et des Nouvelles Énergies)
En Ile de France :
94 bis avenue de Suffren
75015 Paris
www.areneidf.fr

CLER (Comité de Liaison des Énergies Renouvelables)
2B rue Jules Ferry
93100 Montreuil
www.cler.org

Association HESPUL
114 bd du 11 Novembre 1918
69100 Villeurbanne
www.hespul.org

Institut National de l'Énergie Solaire (INES)
Savoie Technolac BP 258
73375 Le Bourget-du-Lac Cedex
www.institut-solaire.com

Syndicat des Énergies Renouvelables (SER) et sa commission photovoltaïque SOLER
13-15 rue de la Baume
75008 Paris
www.enr.fr

INDEX

A

accumulateur 52
- lithium 60
- nickel cadmium 58
- nickel métal hydrures 59
- plomb 56, 57
  - étanche 58

Air Mass 20
ampère-heure 8, 53
arséniure de gallium (GaAs) 43
autonomie « sans apport solaire » 50

B

batterie 39, 51, 117

C

capacité 53, 56, 61, 76
- nominale 54

cellule solaire 1, 2, 4
champ photovoltaïque 87
conditions d'ensoleillement STC 20, 22, 37
conducteur électrique 32
consommation électrique 9, 75
constante solaire 19
conversion photovoltaïque 31
courant
- alternatif 11, 81
- continu 11, 81
- de charge 54
- de court-circuit 37, 93, 99
- de décharge 55
- électrique 5, 6
- nominal 6

courant-tension (courbe) 36
$CuInSe_2$ (CIS) 46

D

décharge profonde 58, 64
détecteur
  crépusculaire 75, 115
  de mouvement 115, 116
  de présence 75
différence de potentiel 5
dimensionnement (logiciels de) 26, 87
diode anti-retour 63
dopage 32
durée de vie 64

E

éclairement (influence de) 41
effet mémoire 59
électrification rurale 71
électron 6, 31
énergie propre 46
environnement (impact sur) 46

F

fil du soleil (fonctionnement au) 49, 72, 97

G

générateur 39
  autonome 49
  d'énergie 11
  de courant 40, 51
  raccordé au réseau 49

I

inclinaison 24
installation (conseils d') 118
intégration 86
isolant électrique 32

J

jonction 32

L

limiteur de surcharge 117
longueur d'onde 15, 17
lumière artificielle 26, 28
lux 28, 77
luxmètre 99

M

module photovoltaïque 1, 2
MPPT 65
multi-jonctions 44, 45

O

ombrage 86
onduleur 81, 83, 87
orientation 24

P

panneau solaire 2, 3, 86
parallèle (montage en) 12, 51, 52, 86
photogénérateur 2, 36
photon 15
photopile 2, 16, 34, 80, 91, 108
pompage photovoltaïque 72
puissance 7, 79
  maximale 37, 41, 95
PWM 65

R

rayonnement
  diffus 20, 25
  direct 20
  global 20
  intégré 22
  solaire 19
récepteur 12, 38, 40, 50
régulateur
  charge/décharge 120
  de charge 64
rendement 37
  énergétique 10
rentabilité 87
réponse spectrale 17
réseau (raccordement au) 83, 85

© DUNOD – La photocopie non autorisée est un délit.

résistance
série 40
shunt 40
RoHS (directive) 60

S

semi-conducteur 32
série (montage en) 13, 34, 35, 52, 81, 86
silicium
amorphe 34, 42, 44, 80, 91
cristallin 33, 80
monocristallin 33, 44
poly (ou multi-) cristallin 33, 44
Soleil 1, 18
spectre 16
solaire 21
STC 20, 22, 37
supercondensateur 61, 99
surcharge 58, 64

T

tarifs de rachat 86
tellurure de cadmium (CdTe) 45
température (influence de) 41
tension 37, 51
de charge 53
de circuit ouvert 36, 92
électrique 5
nominale 5, 52, 56

Mise en pages et numérisation
TyPAO sarl
75011 Paris

Imprimeur ??
N° d'impression : *****
Dépôt légal : juillet 2010